

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 27, 1965/66, no. 3

De relatie tussen enzym, substraat en produkt

L. A. Æ. Sluyterman

577.15

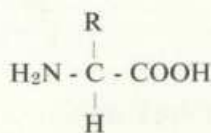
Het doel van het in onderstaand artikel beschreven onderzoek is de katalytische werking van een enzym op zijn substraat beter te leren begrijpen. Het onderzoek is nog in een eerste fase; gepoogd wordt een enzym en een substraat in de vorm van een complex te laten kristalliseren. De wijze waarop dit probleem benaderd wordt, vloeit logisch voort uit een bepaalde relatie tussen enzym, substraat en produkt, waarvan men het bestaan op theoretische gronden mocht veronderstellen en die blijkens de verrichte experimenten bij het gekozen enzym, substraat en produkt inderdaad bestaat.

Inleiding

De structuur van een enzym

Enzymen zijn de katalysatoren van de levende cel. Ze maken het mogelijk dat een grote verscheidenheid van organische reacties plaatsvindt onder de zeer milde condities die in de levende cel heersen.

Enzymen zijn eiwitten met een hoog molecuulgewicht; op zijn minst bedraagt het molecuulgewicht 10 000, in de meeste gevallen echter wel 100 000, en soms nog aanzienlijk meer. Hun grondstructuur is echter zeer eenvoudig. Zoals bekend, zijn eiwitten samengesteld uit een twintigtal soorten aminozuren van de algemene formule:



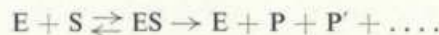
Doordat de NH_2 -groep van het ene aminozuur telkens een zg. peptidebinding vormt met de COOH -groep van een volgend aminozuur, zoals in *fig. 1* is aangegeven, ontstaat een lange en flexibele hoofdketen, waaraan op regelmatige afstanden korte zijketens ontspringen (de R-groepen van de aminozuren). Zo'n zijketen kan een niet-reactieve paraffineketen zijn, de meeste bevatten echter een functionele groep met bepaalde chemische eigenschappen, b.v. zure of basische eigenschappen. De aanwezigheid van zure of basische groe-

pen aan de zijketens is belangrijk voor de ladingstoestand van een eiwit; afhankelijk van de pH van het milieu waarin het eiwit verkeert, zullen deze groepen een negatieve of positieve lading dragen.

De werkzaamheid van een enzym hangt in laatste instantie af van zijn *ruimtelijke* structuur. Deze structuur is doorgaans vrij compact; ze ontstaat door een zich samenvouwen van de hoofdketen. Het is een vrij delicate structuur, die alleen onder bepaalde condities stabiel is, b.v. alleen indien de pH binnen zekere grenzen blijft. Om dit te begrijpen, behoeft men slechts te denken aan de invloed die de positieve en negatieve groepen in het molecuul zullen uitoefenen op het samenvouwen van de keten, en in aanmerking te nemen dat men de verdeling van deze groepen ingrijpend kan wijzigen door de pH te veranderen. In het algemeen moet men dus zeer voorzichtig zijn met het veranderen van het normale milieu van het enzym, om te voorkomen dat de ruimtelijke structuur verloren gaat en het enzym wat men noemt „denatureert”.

De werking van een enzym

De werking van een enzym kan men in het eenvoudigste geval aldus beschrijven:



Een molecuul van het enzym E bindt zich met een molecuul van de te ataqueren verbinding, het substraat S, en vormt hiermee een enzym-substraat-complex ES. Dit complex kan òf weer uiteenvallen in de oorspronkelijke componenten òf — en dan heeft zich

Dr. L. A. Æ. Sluyterman is medewerker van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

dus de katalyse voltrokken — uiteenvallen in het enzym en de reactieprodukten $P + P'$, enz.

In sterkere mate nog dan gewone katalysatoren zijn enzymen gekenmerkt door een grote specificiteit in hun werking. Zo hydrolyseert het enzym urease ureum, maar niet de verwante verbindingen methyleureum en thio-ureum, en de eiwitplitsende enzymen trypsine en

Doel van ons onderzoek is een nadere bestudering van de enzymwerking; wij willen ons van dit proces een gedetailleerde en ruimtelijke voorstelling kunnen maken.

Bij de huidige stand van het onderzoek zijn wij vooral geïnteresseerd in wat zich afspeelt in het actieve centrum. In enkele gevallen heeft men zich hiervan

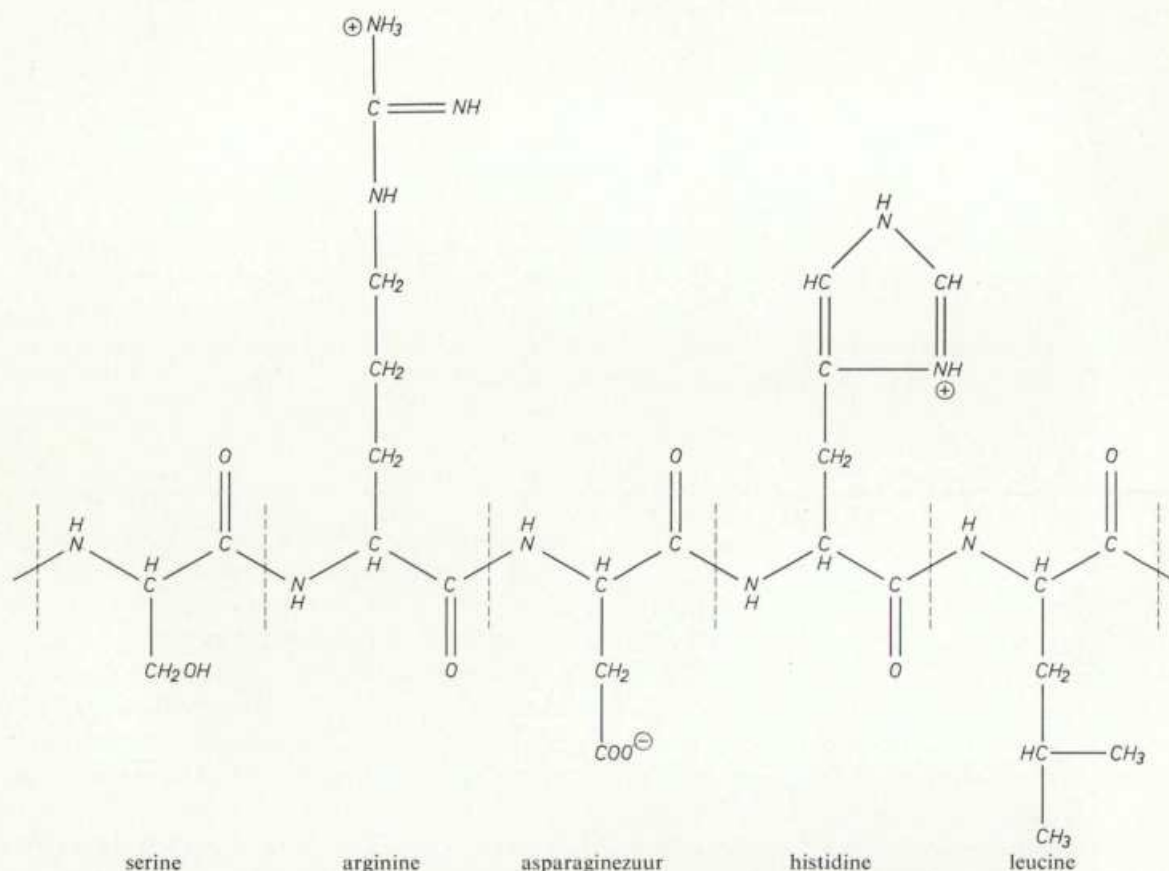


Fig. 1. Schematische voorstelling van een fragment van een eiwitmolecuul met hoofd- en zijketens. De hoofdketen is in de gestrekte toestand, waarin hij hier getekend is, een zig-zag verloopende keten waarin telkens de eenheid $\text{NH}-\text{CH}-\text{CO}$ wordt herhaald. De zijketens ontspringen telkens aan het vet gedrukte C-atoom van deze groep. Het hier getekende fragment van een eiwitmolecuul is samengesteld uit de aminozuren serine, arginine, asparaginezuur, histidine en leucine.

chymotrypsine verbreken allebei peptidebindingen in een eiwit, maar op verschillende plaatsen in het molecuul. Kleine veranderingen in de ruimtelijke structuur van het substraat zijn al voldoende om de complexvorming en daarmee ook de katalytische werking volkomen te belemmeren.

De meeste substraatmoleculen zijn klein in vergelijking met de enzymmoleculen. Bij de complexvorming zal derhalve slechts een klein deel van het enzymmolecuul direct betrokken zijn bij de binding van het substraatmolecuul. Men noemt dit deel van het enzymmolecuul het *actieve centrum*. Welke rol de rest van het enzymmolecuul speelt, is op het ogenblik nog niet met zekerheid bekend — mogelijk heeft het een stabiliserende functie.

reeds enigszins een idee kunnen vormen. Als voorbeeld geven we in fig. 2 een schematische uitbeelding van een mogelijk verloop van de hydrolyse van benzoylglycine-methylester onder invloed van chymotrypsine. We hebben chymotrypsine reeds genoemd als een voorbeeld van een eiwitplitsend enzym. Dat het ook in staat is bepaalde esters te hydrolyseren, is niet zo ongevoen: de esterbinding en de peptidebinding vertonen veel overeenkomst en vele enzymen zijn in staat beide soorten bindingen te verbreken. Een COO^- -groep in het actieve centrum van chymotrypsine blijkt essentieel te zijn voor het tot stand komen van het complex. Is het complex gevormd, dan oefent een imidazolgroep van het centrum katalytische invloed uit op het verbreken van de esterbinding. Uit de afgesplitste CH_3O -

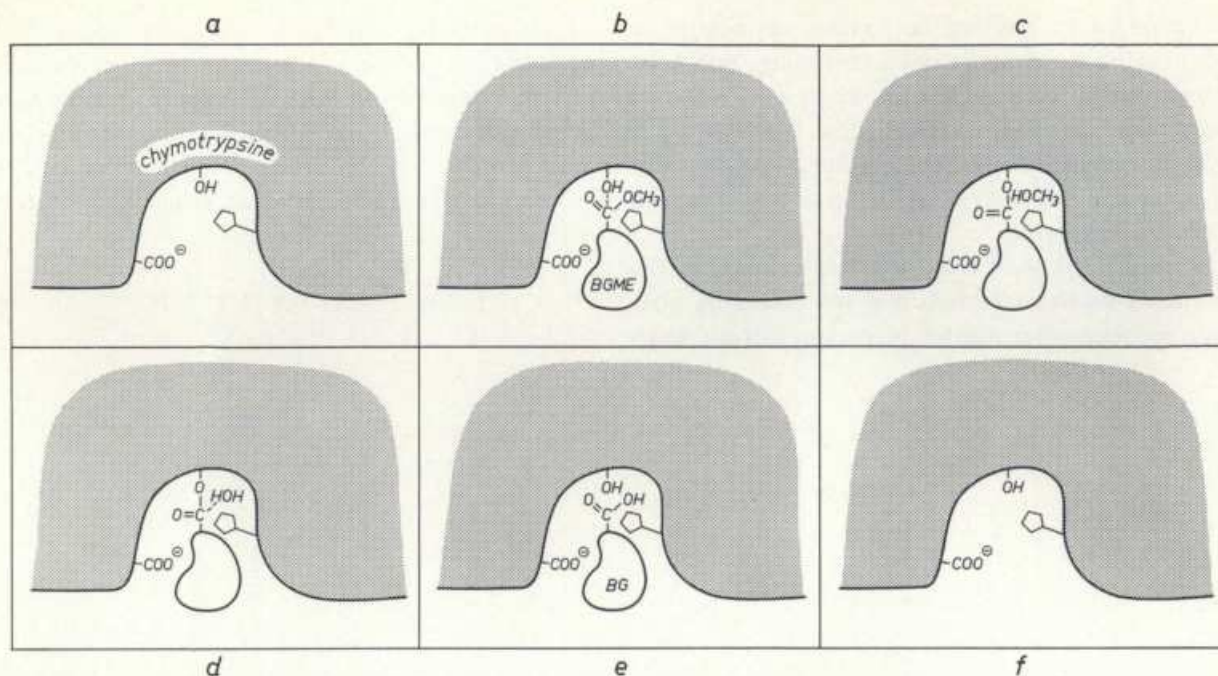


Fig. 2. Schematische en hypothetische voorstelling van de wijze waarop het enzym chymotrypsine het substraat benzoylglycine-methylester (BGME) omzet in benzoylglycine (BG) en methylalcohol. In de holte, het actieve centrum, zijn links getekend een COO^- -groep, bovenaan een OH-groep, en rechts een imidazolgroep. (De in een actief centrum voorkomende groepen behoeven niet, zoals men gauw geneigd zou zijn te denken, te behoren bij opéenvolgende aminozuren. Doordat de eiwitketen in een samengevouwen toestand verkeert, kunnen bepaalde aminozuren in elkaars buurt komen die in gestrekte toestand van de keten zeer ver van elkaar verwijderd zouden zijn. Dit is hier het geval met de OH- en de imidazolgroep.) a) Het enzym met „leeg” actief centrum. b) Het enzym heeft een molecuul van het substraat gebonden. c) Onder invloed van de imidazolgroep is de esterbinding (C-O) verbroken, en is er een nieuwe esterbinding met de OH-groep ontstaan; als resultaat heeft zich methylalcohol (HOCH_3) gevormd. d) Het molecuul methylalcohol heeft plaats gemaakt voor een molecuul water (HOH). e) Opnieuw is onder invloed van de imidazolgroep de esterverbinding verbroken, nu met als resultaat de vorming van benzoylglycine. f) Het enzym is weer in toestand a).

groep vormt zich methylalcohol, terwijl het andere afgesplitste deel van het substraatmolecuul tijdelijk gebonden wordt aan een, in het actieve centrum aanwezige, OH-groep. De laatste stap in dit proces is een gewone hydrolyse, waarbij benzoylglycine gevormd wordt en gelijktijdig het actieve centrum weer vrijkomt voor een nieuwe reactie.

Hoewel bij een reactie als deze globaal het verloop wel bekend is, zouden we b.v. nog meer in detail willen weten hoe het substraat zich met het enzym bindt en ook hoe precies het ruimtelijke verloop van de reactie is.

Voor een dergelijk verdergaand onderzoek van enzymreacties zou men zeer nauwkeurig de ruimtelijke structuur van het actieve centrum, en van het aldaar gebonden substraat, willen kennen. De enige methode waarmee men zich deze kennis kan verschaffen, is de röntgenanalyse. Het eerste doel van ons onderzoek is dan ook geworden om een kristallijn ES-complex in handen te krijgen. De hiertoe ondernomen pogingen hebben tot nog toe geen succes gehad. Japanse onderzoekers hebben als eersten inmiddels bekend gemaakt een kristallijn ES-complex te hebben verkregen [1].

Dit complex heeft echter een te hoog molecuulgewicht om voorshands met enige kans van slagen röntgenanalytisch te kunnen worden onderzocht.

Hetgeen hieronder volgt, is het verslag van onze overwegingen en experimenten die aan onze kristallisatiepogingen zijn *voorafgegaan* [2]. Men zal zich in dit artikel enigszins vertrouwd kunnen maken met de reactiekinetische methodes die bij onderzoek aan enzymen vaak worden toegepast. Doch wat wellicht van groter belang is: men zal zich een inzicht kunnen verwerven in de karakteristieke relatie die er tussen enzym, substraat en produkt kan bestaan.

De wisselwerking enzym-substraat

Voor ons onderzoek hebben we het oog laten vallen op het enzym *papaïne*. Onze overwegingen hierbij zijn geweest dat *papaïne* een betrekkelijk laag molecuulgewicht heeft (22 000), dat het een vrij stabiel enzym is, en dat het met een grote graad van zuiverheid in grote

[1] K. Yagi en T. Ozawa, *Biochim. biophys. Acta* **60**, 200, 1962.

[2] Zie ook L. A. A. Sluyterman, *Biochim. biophys. Acta* **85**, 305 en 316, 1964.

hoeveelheden te bereiden is. Evenals chymotrypsine kan papaïne zowel eiwitten als eenvoudige esters hydrolyseren. Als substraat kozen we de ethylester van benzoylarginine, een verbinding die op eenvoudige wijze te synthetiseren is. De structuur van deze verbinding en de reactievergelijking van de hydrolyse zijn in fig. 3 weergegeven.

In de praktijk doet zich, wat deze combinatie van enzym en substraat betreft, nog een belangrijk algemeen probleem voor, maar de bespreking hiervan, waar-

ten ofwel *reactieconstanten* k_r en k_{-r} zijn een maat voor de activeringsenergie van resp. de heen- en de terugreactie. Het effect van een katalysator is, zoals men begrepen zal hebben, dat hij de activeringsenergie verlaagt.

Voor ons geval kunnen we de vergelijking opschrijven:

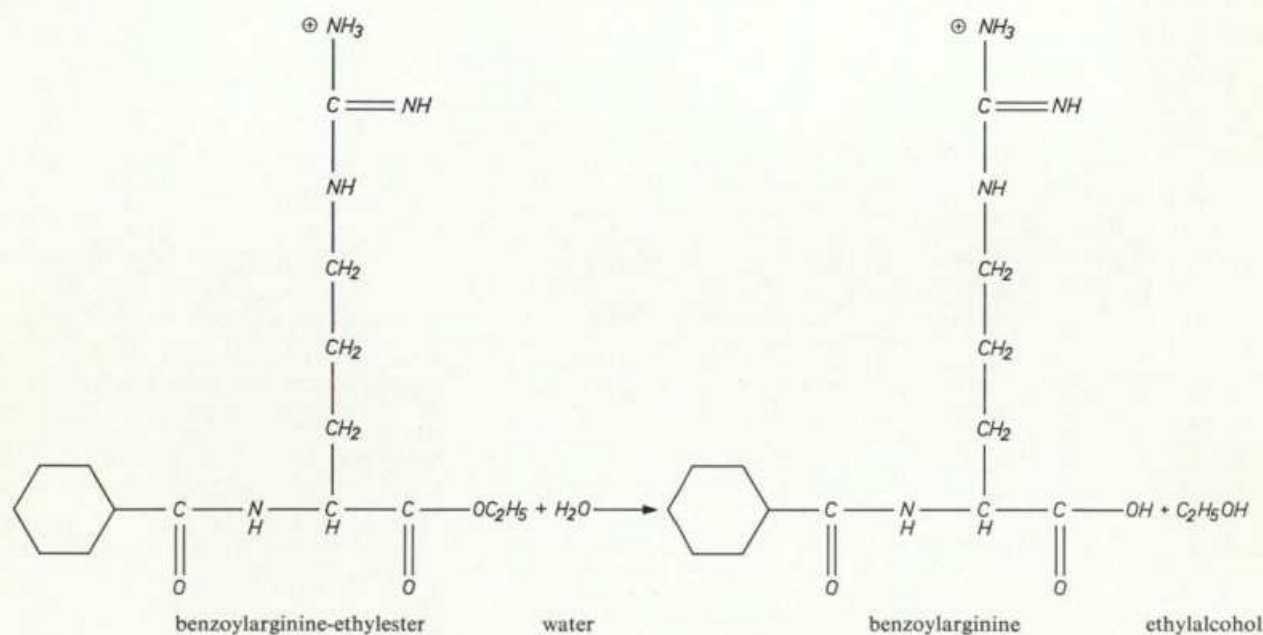
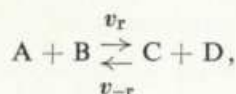


Fig. 3. Reactievergelijking van de hydrolyse van benzoylarginine-ethylester.

bij de vermelde relatie tussen enzym, substraat en produkt ter sprake komt, stellen we uit tot het volgende hoofdstuk. Eerst willen we nog de bepaling van de „associatieneiging” van enzym en substraat bespreken, en vervolgens de invloed van de pH op deze associatieneiging. Deze gegevens maken vaak conclusies mogelijk omtrent de aanwezigheid van bepaalde functionele groepen in het actieve centrum.

De bepaling van de associatieconstante

Bij een reactie als



zijn de reactiesnelheden van de heen- en terugreactie resp.:

$$v_r = k_r [A] [B] \quad \text{en} \quad v_{-r} = k_{-r} [C] [D],$$

waarin [A], [B], [C] en [D] de concentraties van de betrokken stoffen voorstellen. De evenredigheidsconstan-

De neiging van E en S om zich tot het complex ES te binden, komt tot uitdrukking in de verhouding k_1/k_{-1} , de zg. *associatieconstante*. De stoffen P en P' zijn in het te beschouwen geval resp. benzoylarginine en ethylalcohol. De reactie vindt in waterig milieu plaats. Water is gemakshalve niet in de reactievergelijking opgenomen, omdat het in een zo grote overmaat aanwezig is dat de veranderingen in de concentratie van water die het gevolg zijn van het verlopen van de reactie, geen merkbare invloed hebben op de reactiesnelheid. Voor de reactiesnelheid v van de totale reactie ($E + S \rightarrow E + P + P'$) is een volkomen exacte afleiding niet mogelijk. In de praktijk kiest men echter de omstandigheden meestal zodanig dat bepaalde vereenvoudigingen kunnen worden toegepast en de formule geldt ^[3]:

$$v = \frac{e k_2 [S]}{[S] + 1/K}, \quad \dots \quad (2)$$

waarin $e = [E] + [ES]$, d.i. de totale hoeveelheid enzym, al dan niet in gebonden vorm voorkomend, en $K = k_1/(k_{-1} + k_2)$. In de meeste enzymreacties van dit

type is $k_2 \ll k_{-1}$ en is dus K nagenoeg gelijk aan k_1/k_{-1} ; we zullen in dit artikel steeds veronderstellen dat dit het geval is. Verg. (2) schrijft men meestal in de vorm:

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{ek_2} + \frac{1}{ek_2 K[S]} \quad \dots \quad (3)$$

Zet men gemeten waarden $1/v$ uit tegen $1/[S]$, dan moet volgens deze vergelijking een rechte worden verkregen. Het stuk dat deze rechte afsnijdt van de $1/v$ -as is gelijk aan $1/ek_2$ en de helling is gelijk aan $1/ek_2 K$. Op deze wijze kan men zowel k_2 als K uit de meetresultaten berekenen (zie fig. 4).

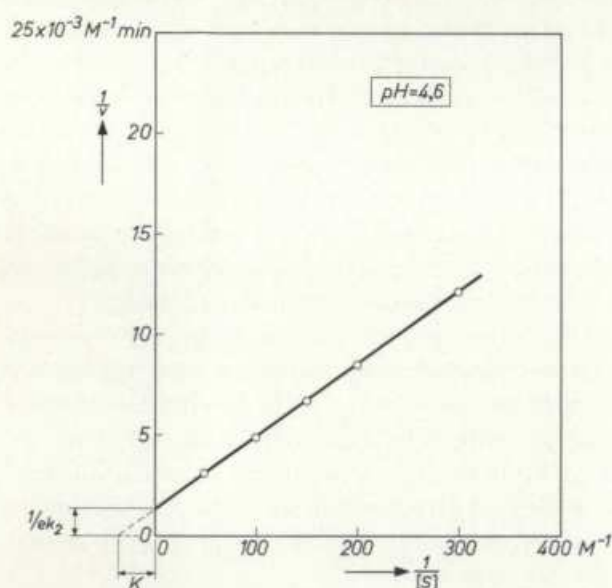


Fig. 4. De hydrolyse van benzoylarginine-ethylester onder invloed van papaïne bij $pH = 4,6$. De reciproke hydrolysesnelheid $1/v$ is uitgezet tegen de reciproke concentratie $1/[S]$ van benzoylarginine-ethylester.

Uit het feit dat bij de metingen van ons systeem een rechte wordt verkregen, kan men concluderen dat verg. (1) inderdaad aan de enzymreactie ten grondslag ligt, met andere woorden dat één molecuul papaïne zich met één molecuul benzoylarginine-ester tot een complex bindt en dat vervolgens één molecuul benzoylarginine en één molecuul alcohol worden gevormd.

De invloed van de pH op de associatieneiging

In fig. 5 is de associatieconstante K van papaïne en benzoylarginine-ester gegeven als functie van de pH . Voor een aantal andere substraten van papaïne zijn dezelfde bepalingen verricht en in de meeste gevallen verkreeg men deze zelfde klokvormige curve met een maximum bij $pH = 6$ en halve maximumwaarden bij $pH = \text{ca. } 4$ en 8 .

Men heeft uit het verloop van de *linkse* tak van de curve geconcludeerd dat een COOH -groep in het actie-

ve centrum aanwezig moet zijn en dat deze in negatief geïoniseerde toestand moet verkeren, wil vorming van het ES-complex mogelijk zijn — precies zoals ook bij chymotrypsine het geval is. Men kan nl. berekenen dat bij $pH = 3$ slechts een uiterst kleine fractie van dergelijke COOH -groepen geïoniseerd is, dat bij $pH = 4$ de fractie ongeveer de helft bedraagt en dat bij $pH = 6$ de ionisatie vrijwel volledig is. Dit is dus zeer fraai in overeenstemming met het gevonden verloop der curve voor pH -waarden < 6 . Welke groep het verloop van de *rechtse* tak van de curve bepaalt, is op het moment nog niet met zekerheid bekend. Dit is voor het hier te bespreken onderzoek verder ook niet van belang. Op de vermoedelijke aanwezigheid van een COO^- -groep in het actieve centrum van het enzym komen we echter later terug.

De relatie substraat-product

Wat is nu het eigenlijke probleem? Als we papaïne in waterig milieu laten inwerken op benzoylarginine-ester, dan zal het gevormde complex, wegens de overmaat water, veel te snel hydrolyseren om het ontstaan van een ES-kristal mogelijk te maken. Het ligt erg voor de hand derhalve de reactie uit te voeren met een zeer geringe hoeveelheid water — of zelfs geheel zonder water: de reactie *stopt* dan bij de vorming van het ES-complex, hetgeen voor ons doel alleen maar gunstig

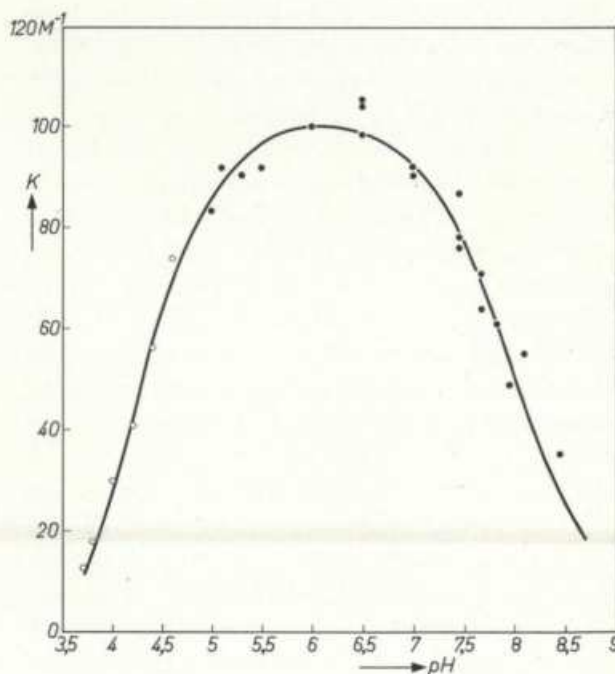


Fig. 5. De associatieconstante K van benzoylarginine-ethylester als functie van de pH . De zwarte meetpunten van de rechtse tak van de curve zijn ontleend aan E. L. Smith en M. J. Parker [4].

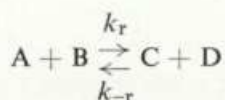
[3] M. Dixon en E. C. Webb, *Enzymes*, Longmans, Londen 1964.

[4] E. L. Smith en M. J. Parker, *J. biol. Chem.* **233**, 1387, 1958.

is —, maar de moeilijkheid is dat papaïne, zoals elk enzym, in waterig milieu *moet* verkeren, wil het niet „denatureren”. Onderzoek van het enzym in zijn gedatureerde vorm, waarin het zijn normale ruimtelijke structuur niet heeft en waarin het zijn normale functie niet kan uitoefenen, heeft uiteraard voor ons doel geen zin.

Om de door ons geprobeerde uitweg uit deze moeilijkheid begrijpelijk te maken, zullen we eerst iets nader moeten ingaan op de wijze waarop een reactie kan worden beïnvloed door een „echte” katalysator, d.w.z. een stof die de reactie versnelt zonder zelf bij dat proces verbruikt te worden (hetgeen bij enzymen het geval is).

Het totstandkomen van het evenwicht bij een reactie als



kan men zowel uit een kinetische als uit een thermodynamische gezichtshoek beschouwen. Bezien van kinetisch standpunt, komt het evenwicht tot stand zodra de reactiesnelheid in de heenrichting $k_r[A][B]$ gelijk wordt aan de reactiesnelheid in de omgekeerde richting $k_{-r}[C][D]$, en van thermodynamisch standpunt bezien, zodra de vrije energie (eigenlijk de vrije enthalpie) van het hele systeem minimaal is geworden. Aangezien er bij de reactie per definitie niets van de katalysator verloren gaat, kan de aanwezigheid van de katalysator geen invloed hebben op de vrije energie van het systeem, en dus zal de katalysator de ligging van het evenwicht niet kunnen beïnvloeden. Met andere woorden: de verhouding der reactieconstanten van de heen- en de terugreactie (k_r/k_{-r}) kan door toedoen van de katalysator niet veranderd worden. Dat wil zeggen dat een katalysator die de heenreactie versnelt de bijbehorende terugreactie *met dezelfde factor* moet versnellen. De termen substraat en produkt hebben dus slechts een relatieve betekenis: een verbinding die produkt is bij de heenreactie, is immers substraat bij de, eveneens versnelde, terugreactie. Zo kunnen we met papaïne als enzym benzoylarginine-ethylester in een verdunde, waterige oplossing hydrolyseren, en dan verkrijgen we benzoylarginine en alcohol. Maar ook kunnen we uitgaan van benzoylarginine in een alcoholrijke oplossing en dan wordt onder invloed van hetzelfde enzym op zijn beurt benzoylarginine-ethylester gevormd.

Zoals we hebben gezien, gaat er een complexvorming tussen het enzym papaïne en het substraat benzoylarginine-ester vooraf aan de omzetting in benzoylarginine en alcohol. Indien een produkt, door omkering van de reactie, substraat wordt, lijkt het waarschijnlijk dat ook

dit produkt een complex met het enzym vormt. Het idee is nu om bij onze kristallisatiepogingen het van de andere kant te proberen, dus uitgaande van benzoylarginine. Ons streven zal dan niet meer zijn om een ES-maar om een EP-complex te doen kristalliseren. Ook een EP-complex moet in een waterig milieu verkeren, maar de aanwezigheid van water kan nu geen kwaad, omdat nu niet hydrolyse, maar verestering het gevaar vertegenwoordigt. En dit gevaar kan men gemakkelijk bezweren door de complexvorming in afwezigheid van alcohol te doen plaatsvinden, een maatregel die, in tegenstelling tot het weglaten van water, *niet* tot denaturering leidt. Zo ziet men dat het inderdaad zinvol is om het probleem van de andere kant aan te pakken [5].

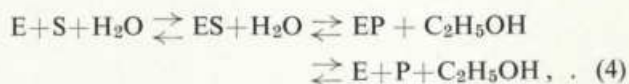
Wel dient men te bedenken dat de zekerheid dat er zich ook werkelijk een complex vormt, voor het *produkt* vooralsnog ontbreekt. Voor het substraat heeft men het bestaan van een complex aangetoond op de wijze als op blz. 61 is beschreven; voor het produkt is deze weg niet mogelijk omdat de conditie dat men in een waterrijk (en dus alcoholarm) milieu moet werken, nauwelijks ruimte laat voor experimenten met dit doel.

De gewenste zekerheid dat benzoylarginine een complex met papaïne vormt, hebben we ons kunnen verschaffen met de in het volgende hoofdstuk beschreven onderzoeken. Bij deze onderzoeken laten we steeds het substraat in een waterrijk milieu hydrolyseren en onderzoeken we telkens de invloed van bepaalde, toegevoegde hoeveelheden van het produkt op de snelheid van deze reactie.

De wisselwerking enzym-produkt

Competitieve inhibitie

We beginnen met te stellen dat bij een reactie die door „echte” katalysatoren versneld wordt, bij de heen- en bij de terugreactie dezelfde stadia doorlopen worden. Voor een bewijs van deze stelling zij naar de literatuur verwezen [6]. Indien bij de reactie zowel het produkt als het substraat een complex met het enzym vormen, zoals we wensen, en de reactie dus als volgt verloopt:



kan het niet anders of produkt en substraat moeten beide in hetzelfde actieve centrum van het enzym gebonden worden. In dat geval zal de bezetting van een actief centrum door substraatmoleculen die plaats

[5] Dezelfde opzet als de onze heeft bij een ander enzym als papaïne reeds tot succes geleid, zie de toevoeging aan het slot van dit artikel.

[6] Zie b.v. A. A. Frost en R. G. Pearson, Kinetics and mechanism, blz. 202-203, Chapman and Hall, Londen 1953.

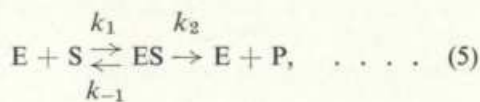
blokkeren voor produktmoleculen, en omgekeerd. Met als gevolg dat de aanwezigheid van de een remmend zal werken op de omzetting van de ander; men noemt dit verschijnsel „competitieve inhibitie”.

In de thans te beschrijven experimenten laten we benzoylarginine-ester hydrolyseren onder invloed van papaïne bij aanwezigheid van een zekere hoeveelheid benzoylarginine. Voor hetgeen we willen bewijzen, is het het eenvoudigst om de reactie zonder alcohol uit te voeren en bovendien de metingen slechts te verrichten gedurende de tijd dat de hoeveelheid alcohol die zich tijdens de reactie vormt, verwaarloosbaar klein is. Dit betekent in feite dat we de terugreactie niet verder laten gaan dan tot de complexvorming, en we dus met de volgende reactie te doen hebben:

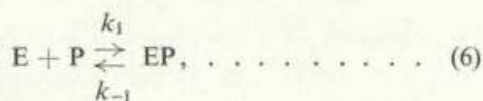


waarin P staat voor benzoylarginine. De reden waarom we zoveel mogelijk vermijden om alcohol aan de reactie te laten deelnemen is eenvoudig dat we de reactie niet ingewikkelder willen maken dan voor onze experimenten nodig is.

De reactiesnelheid v_1 van de reactie



die competitief geremd wordt door de reactie



wordt volgens een eenvoudige berekening [3] gegeven door:

$$\frac{1}{v_1} = \frac{1}{ek_2} + \frac{1}{ek_2K_S} \left(1 + K_P [P] \right) \frac{1}{[S]}, \quad \dots \quad (7)$$

waarin $K_P = k_1/k_{-1}$ de associatieconstante is van het enzym-inhibitor-complex EP en $e = [E] + [ES] + [EP]$. Voor een betere onderscheiding wordt de associatieconstante van het substraat nu verder met K_S aangeduid. (Als $[P]$ nul is, wordt de vergelijking identiek met verg. 3.)

Variëren we de concentratie $[S]$ van het substraat bij een constante concentratie $[P]$ van de competitieve inhibitor, dan moeten we volgens (7) een rechte lijn vinden die van de $1/v$ -as een stuk $1/ek_2$ afsnijdt.

Zoals we reeds eerder in fig. 4 hebben gezien, wordt ook bij afwezigheid van een competitieve inhibitor een stuk $1/ek_2$ van de $1/v$ -as afgesneden. Dit is wat men ook zou verwachten, aangezien immers bij oneindig grote concentratie van het substraat ($1/[S] = 0$) de concurrentie van de, in een constante en dus beperkte concentratie aanwezige, inhibitormoleculen zich niet

meer kan doen gelden. Men kan dat ook anders begrijpen: bij oneindig grote concentratie van het substraat dragen, of nu inhibitor aanwezig is of niet, alle enzymmoleculen bij tot de omzetting van het substraat, d.w.z. dat in beide gevallen $v = ek_2$.

In fig. 6 is met open cirkels en kruisjes het resultaat weergegeven van twee door ons uitgevoerde series metingen van de hydrolysesnelheid van benzoylarginine-ester resp. bij afwezigheid van benzoylarginine en bij aanwezigheid van een constante concentratie hiervan.

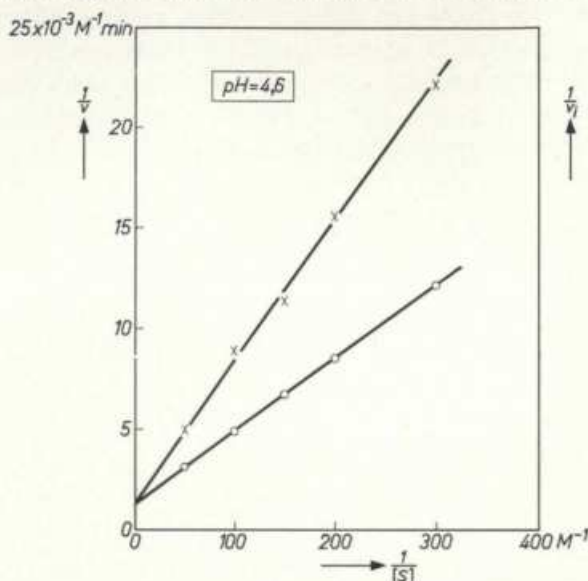


Fig. 6. De reciproke snelheden $1/v$ en $1/v_1$ van de hydrolyse van benzoylarginine-ethylester onder invloed van papaïne, resp. bij afwezigheid van benzoylarginine (cirkels) en bij aanwezigheid van $3,35 \times 10^{-2}$ M benzoylarginine (kruisjes), bij een pH van 4,6. Op de abscis is de reciproke concentratie $1/[S]$ van benzoylarginine-ethylester uitgezet. De met cirkels aangegeven meetpunten zijn dezelfde als in fig. 4. Uit het feit dat beide rechten elkaar op de $1/v$ -as snijden, kan men concluderen dat benzoylarginine-ethylester en benzoylarginine competitieve inhibitie vertonen, dat wil zeggen dat ze op hetzelfde actieve centrum van papaïne omgezet worden.

De twee rechten snijden elkaar op de $1/v$ -as en op grond van dit feit mogen we concluderen dat benzoylarginine-ester en benzoylarginine op hetzelfde actieve centrum van papaïne tot een complex gebonden worden. Dit bevestigt onze verwachting dat de beschouwde enzymreactie verloopt volgens verg. (4).

Het aantal moleculen betrokken bij de complexvorming

We variëren thans, juist andersom dan zoeven, de concentratie van de inhibitor benzoylarginine, en we houden de concentratie van het substraat benzoylarginine-ester constant. Gebruik makend van verg. (3), schrijven we verg. (7) in de vorm:

$$\log \left(\frac{v}{v_1} - 1 \right) = \log \frac{[P]K_P v}{ek_2 K_S [S]} = \log [P] + C, \quad (8)$$

waarin C een constante is. Als we $\log \{ (v/v_1) - 1 \}$ uitzetten tegen $\log [P]$, moeten we volgens (8) een rechte

vinden met een helling 1. Dit levert weer een mogelijkheid onze veronderstellingen te toetsen.

Vergelijking (8) is gebaseerd op de reactievergelijkingen $E + S \rightleftharpoons ES \rightarrow E + P$ en $E + P \rightleftharpoons EP$, wat zeggen wil dat verondersteld is dat zowel bij de complexvorming van E en S als van E en P de componenten in de verhouding één op één voorkomen. De eerste veronderstelling is reeds bevestigd door het gevonden resultaat in fig. 4. De tweede wordt thans bevestigd doordat we bij het uitzetten van $\log \{(v/v_1) - 1\}$ inderdaad een rechte met helling 1 vinden, zie fig. 7. (Men kan gemakkelijk nagaan dat als de reactievergelijking $E + nP \rightleftharpoons EP_n$ was geweest, we een helling n hadden moeten vinden; in dat geval komt nl. de concentratie $[P]$ in verg. (8) in de n -de macht voor.)

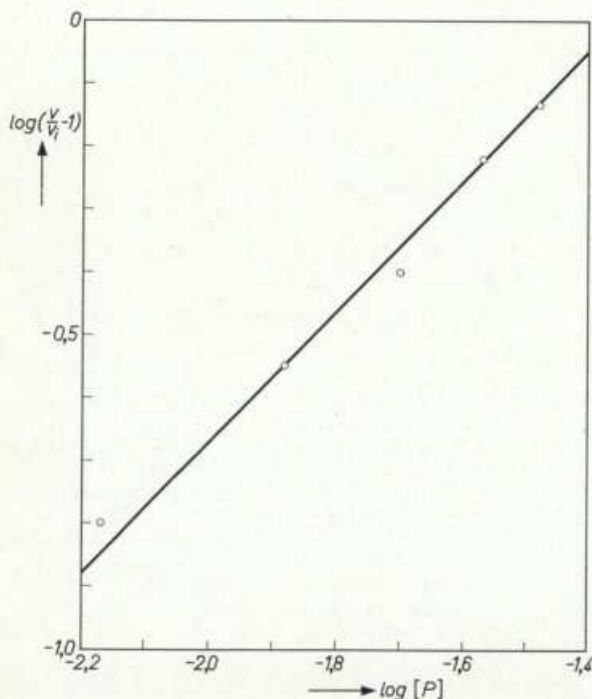


Fig. 7. Door de concentratie $[P]$ van de inhibitor te variëren bij een constante concentratie van het substraat en de invloed hiervan op de hydrolysesnelheid te beschouwen, kan men conclusies trekken omtrent het aantal moleculen dat betrokken is bij de complexvorming tussen inhibitor en enzym. Zoals de figuur laat zien, verloopt $\log \{(v/v_1) - 1\}$ als functie van $\log [P]$ met een helling nagenoeg gelijk aan één. Dit betekent een verhouding van één op één in de aantallen der moleculen inhibitor en enzym.

Zo hebben we dus vastgesteld dat de complexvorming van papaïne zowel met het produkt als met het substraat plaats heeft met één molecuul per actief centrum. Dit is onze tweede aanwijzing dat de enzymreactie verloopt als door verg. (4) is aangegeven.

De invloed van de pH op de associatieneiging

In fig. 8 is de associatieconstante K_P van het complex van papaïne en benzoylarginine uitgezet als functie

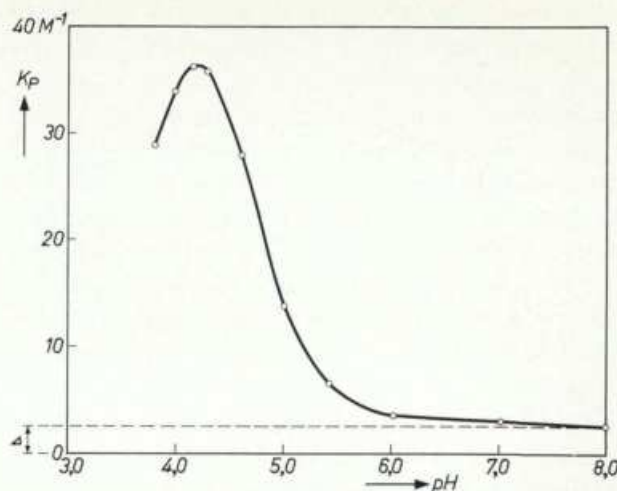


Fig. 8. De associatieconstante K_P van benzoylarginine-methylester als functie van de pH.

van de pH. Voor de wijze waarop men deze associatieconstante bij een gegeven pH berekent, beschouwe men de vergelijkingen (3) en (7) en fig. 6. De helling van de bovenste rechte is volgens verg. (7) gelijk aan

$$\frac{1}{ek_2K_S} (1 + K_P[P]),$$

en die van de onderste rechte volgens verg. (3) gelijk aan

$$\frac{1}{ek_2K_S}.$$

De concentratie $[P]$ van benzoylarginine is bij deze bepalingen bekend, dus is K_P voor elke pH direct uit de verhouding der beide hellingen te berekenen. De aldus gevonden en in de figuur weergegeven curve, die een maximum heeft bij $pH = 4$, lijkt in het geheel niet op de klokvormige curve met zijn maximum bij $pH = 6$ die voor het complex van papaïne en benzoylarginine-ester bepaald is (fig. 5). Er is een aannemelijke verklaring voor het gevonden verschil.

Wij hebben reeds besproken dat het verloop der laatstgenoemde curve in het pH-interval van 3 tot 6 toegeschreven moet worden aan de ionisering van een COOH-groep op het actieve centrum tot een COO⁻-groep. De estergroep van het substraat blijft in dit pH-interval neutraal. Heel anders is de situatie bij de inwerking van het enzym op het produkt. Behalve de COOH-groep van het actieve centrum van het enzym kan ook de COOH-groep van het produkt geïoniseerd worden.

Bij $pH = 8$ is de ionisatie van beide COOH-groepen volledig. Bij deze pH-waarde zullen de COO⁻-groep van het actieve centrum en de COO⁻-groep van het produkt elkaar door hun gelijke lading afstoten, met als gevolg dat de neiging tot complexvorming slechts klein is. Bij $pH = 6$ is het produkt nog grotendeels in zijn ge-

ioniseerde vorm, en pas bij verdere afneming van de pH zal de fractie van de produktmoleculen met een neutrale carboxylgroep aanzienlijk toenemen, en mogen we een toeneming van de associatieconstante verwachten. Dit gaat zolang door tot ook de COO^- -groep van het actieve centrum geneutraliseerd wordt. We weten reeds dat het actieve centrum hierdoor geïnactiveerd wordt. Het gevolg van de aanwezigheid van de $COOH$ -groep in het produktmolecuul is een verschuiving van het maximum van de associatiecurve naar een lagere pH . Kwalitatief is aldus het verschil tussen de curven in de fig. 5 en 8 wel verklaard. Maar ook een meer kwantitatieve vergelijking kan gemaakt worden.

Het is duidelijk dat we voor een kwantitatieve vergelijking der associatiecurves van het substraat en het produkt, het produkt met de *ongeladen* carboxylgroep (dat we P_I willen noemen) moeten stellen tegenover het substraat met zijn eveneens ongeladen estergroep. We zullen dit doen in het pH -gebied van 3,7 tot 5,5, waar de inhibitie voornamelijk op rekening komt van P_I . Bij $pH = 8$ is de — veel geringere — inhibitie vrijwel uitsluitend toe te schrijven aan produktmoleculen met een *geïoniseerde* carboxylgroep (die we P_{II} noemen).

Voor het berekenen van de associatieconstante K_{PI} van P_I , dienen we verg. (7) in een gewijzigde vorm te brengen. In de eerste plaats moeten we K_P , die immers geldt voor beide inhibitoren te zamen, corrigeren voor de inhibitie van P_{II} . Een ruwe maar voldoende nauwkeurige correctie is het aftrekken van het bedrag Δ dat door de stippellijn in fig. 8 is aangegeven: in plaats van K_P schrijven we in de formule $K_{PI} + \Delta$. Ten tweede moeten we in de formule in plaats van de concentratie $[P]$ de concentratie $[P_I]$ van de niet-geïoniseerde vorm schrijven. Het berekenen van $[P_I]$ gebeurt voor elke pH -waarde met behulp van de bekende waarde van de dissociatieconstante van de desbetreffende $COOH$ -groep:

$$K_{diss} = \frac{[COO^-][H^+]}{[COOH]} = \frac{[P_{II}][H^+]}{[P_I]}$$

De aldus berekende associatieconstante K_{PI} van P_I is in fig. 9 te zamen met de associatieconstante K_S van het substraat S uitgezet als functie van de pH (resp. kruisjes en cirkels). De overeenstemming is zeer fraai te noemen.

Onderzoek uitgevoerd met andere substraten

Ten slotte nog de vermelding van twee resultaten verkregen bij gebruik van andere substraten. Andere onderzoekers hebben in plaats van benzoylarginine-ester als substraat benzoylglycylglycine genomen ^[7], een verbinding die evenals benzoylarginine een $COOH$ -

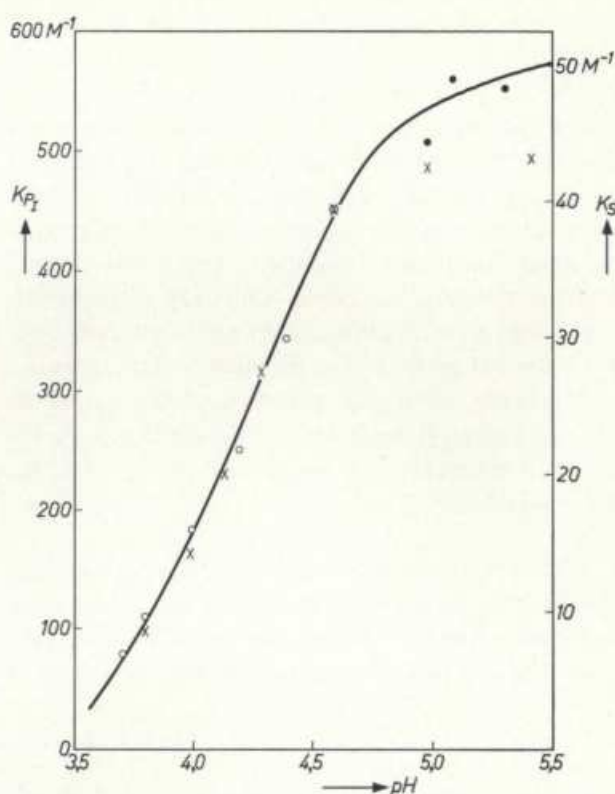


Fig. 9. De associatieconstante K_S van benzoylarginine-ethylester (cirkels) en de associatieconstante K_{PI} van benzoylarginine in niet-geïoniseerde vorm (kruisjes). De zwarte stippen geven enkele meetpunten met betrekking tot benzoylarginine-ester die ontleend zijn aan E. L. Smith en M. J. Parker ^[4].

groep bezit. Het is in overeenstemming met onze verwachting dat men in het pH -gebied van 4 tot 9 een afneming van de associatieconstante vond (fig. 10), zoals wij voor benzoylarginine gevonden hebben. Zou men

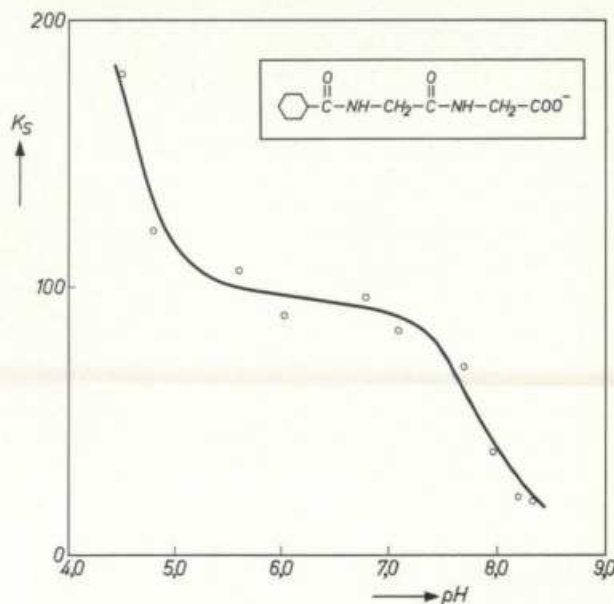


Fig. 10. De associatieconstante K_S van benzoylglycylglycine als functie van de pH , in willekeurige eenheden. (Ontleend aan E. L. Smith, V. J. Chavré en M. J. Parker ^[7].)

^[7] E. L. Smith, V. J. Chavré en M. J. Parker, J. biol. Chem. **230**, 283, 1958.

de onderzoeken tot pH-waarden kleiner dan 4 hebben uitgestrekt, dan zou men vermoedelijk een overeenkomstige daling hebben geconstateerd.

In de tweede plaats zij een eigen onderzoek vermeld met benzoylglycine-ester als substraat. Dit substraat wordt veel langzamer door papaïne omgezet dan benzoylarginine-ester. De vraag was interessant of nu ook het produkt een slechtere inhibitor zou zijn dan benzoylarginine (hetgeen op grond van onze veronderstellingen heel goed mogelijk, zij het niet noodzakelijk is). Dit bleek het geval te zijn: de inhibitorwerking is zes maal zo klein. De specificiteit van papaïne ten opzichte van het substraat vindt men in dit geval dus als het ware weerspiegeld in de specificiteit ten opzichte van het produkt.

We zouden de resultaten van ons onderzoek kunnen samenvatten als het constateren van een zekere mate van *overeenkomst* tussen het gekozen substraat en produkt. Het zou zeker interessant zijn eens na te gaan of

we hier met een algemene regel te doen hebben, maar voorlopig is dit nog zuiver speculatie. Voor ons onmiddellijke doel is het voldoende een aantal aanwijzingen te hebben gevonden dat we inderdaad een geschikt „produkt” hebben gekozen als substraat voor de vorming van een kristallijn enzym-substraat-complex.

Opmerking bij het ter perse gaan: Tijdens het persklaar maken van dit artikel werd in de literatuur melding gemaakt van de geslaagde kristalvorming van EP-complexen zoals boven besproken, met het enzym lysozym (L. N. Johnson en D. C. Phillips, *Nature* **206**, 761, 1965). Uit de tot dusver verkregen resultaten van de röntgenanalyse kon men de plaats van het actieve centrum lokaliseren en tevens met vrij grote zekerheid vaststellen welke groepen van het enzym lysozym bij de complexvorming betrokken zijn. Er wordt gewerkt aan een verfijning van het onderzoek teneinde een nauwkeurig beeld van de wijze van binding te verkrijgen. Uit het experimenteel vastgestelde feit dat de desbetreffende produkten competitieve inhibitie uitoefenen op het enzym mag de conclusie worden getrokken dat het aldus onderzochte actieve centrum tevens de plaats is waar het substraat door het enzym wordt afgebroken.

Samenvatting. Zoals alle echte katalysatoren, versnellen enzymen niet alleen een reactie in de voorwaartse richting, maar ook de overeenkomstige terugwaartse reactie. Het produkt van de voorwaartse reactie zal derhalve het substraat van de terugreactie zijn, en men moet verwachten dat de wisselwerking tussen enzym en substraat in bepaalde opzichten overeen zal komen met die tussen enzym en produkt. Dit beginsel werd nagegaan met het enzym papaïne, waarbij een eenvoudig synthetisch substraat (benzoylarginine-ester) en het corresponderende produkt (benzoylarginine) werden gebruikt. Uit reactiekinetische experimenten

konden vijf aanwijzingen voor het gestelde worden afgeleid.

Dit onderzoek was nodig als voorbereiding voor thans ondernomen pogingen ter kristallisatie van een enzym-substraat-complex, die tot doel hebben een röntgenanalyse van een dergelijk complex mogelijk te maken. Bij gebruik van benzoylarginine-ester als substraat stuit men op de moeilijkheid dat het complex of te snel hydrolyseert of denatureert. De experimenteel verkregen aanwijzingen maken het waarschijnlijk dat men het produkt benzoylarginine geschikt kan gebruiken ter verkrijging van het gewenste complex.

Het verlichten van tunnelingangen fysiologisch-optisch beschouwd

D. A. Schreuder

628.971.6:624.19:612.84

De laatste jaren is er in Philips' Lichttechnisch Laboratorium te Eindhoven een uitvoerig onderzoek verricht omtrent de vraag hoe een verkeerstunnel verlicht moet worden opdat een autobestuurder deze veilig kan passeren zonder abnormaal langzaam te rijden. Een deel van de proeven vindt men beschreven in het onderstaande artikel. Het gaat hier in het bijzonder om de effecten die optreden in het oog van een autobestuurder die een lange — inwendig dus relatief donkere — tunnel nadert en binnengaat. De uit deze proeven afgeleide praktische conclusies hebben een belangrijke invloed gehad op het ontwerp van de verlichting van de Coentunnel, die thans westelijk van Amsterdam in aanbouw is onder het Noordzeekanaal.

Inleiding

De toeneming van het verkeer, zowel te land als te water, eist in een steeds stijgend aantal gevallen dat een kruising van verkeersaders wordt gerealiseerd met behulp van een tunnel. Betreft het kruisingen van wegen, dan is de onderdoorgang meestal zo kort dat men er doorheen kan kijken; verlichting is dan dikwijls niet nodig.

Geheel anders is de situatie bij lange tunnels, zoals men aantreft onder rivieren en kanalen, of in bergen. In zulke tunnels kan een passerende autobestuurder de aanwezige obstakels niet zien afsteken tegen het licht van de uitgang. Hier is, ook overdag, een doeltreffende verlichting noodzakelijk ^[1].

De problemen die men bij het ontwerpen van zo'n verlichting ontmoet, en die we in dit artikel nader willen beschouwen, vinden in laatste instantie hun oorzaak in het feit dat het zonder in exorbitant grote en dure installaties te vervallen, niet mogelijk is het interieur van een tunnel zodanig te verlichten dat de helderheid ervan die van een open, door de zon beschenen weg evenaart of zelfs maar benadert: zelfs bij goed verlichte tunnels zal de passerende autobestuurder de luminantie zien afnemen tot een waarde die dikwijls niet hoger is dan 1/500 van de luminantie buiten. Een dergelijke verandering van luminantie kan door het oog van een autobestuurder alleen verwerkt worden wanneer de verandering niet al te snel plaatsvindt. Ontbreekt de noodzakelijke tijd, dan blijft de adaptatietoestand van het oog gedurende enige tijd ver achter bij die van het luminantieniveau. Hij ziet dan nagenoeg niets.

De betrekkelijk langzame adaptatie is echter niet de enige moeilijkheid die het oog ons hier oplevert. Ook wanneer de autobestuurder zich nog voor de tunnelingang in het volle daglicht bevindt, kunnen zich reeds moeilijkheden voordoen. Deze zijn het gevolg van een zg. *inductie-effect*, d.w.z. van een effect waardoor de gevoeligheid (adaptatietoestand) van een bepaald deel van het netvlies mede bepaald wordt door die van de andere delen; doordat een vrij groot deel van het netvlies sterk verlicht wordt, stelt de gevoeligheid van het deel van het netvlies waarop de tunnelingang is afgebeeld, zich niet in op de relatief geringe luminantie van de ingang, maar op een aanzienlijk hogere. Is dit effect te sterk, dan ziet de autobestuurder de tunnelingang als een zwart gat waarin generlei detail te onderscheiden valt. Anders gezegd: hij kan de tunnel niet inkijken ^[2] (fig. 1).

Het is de taak van de verlichtingstechnicus een zodanige overgangsverlichting te ontwerpen dat de adaptatietoestand van het oog van een autobestuurder die een tunnelingang nadert, niet te sterk achterblijft, en dat er ook geen storend „zwarte-gat-effect" optreedt. In Philips' Lichttechnisch Laboratorium te Eindhoven is nu een aantal onderzoeken gedaan met het doel de kennis van deze effecten zodanig te vergroten dat er bruikbare richtlijnen zouden kunnen worden opgesteld voor het ontwerpen van installaties voor tunnelverlichting. De belangrijkste resultaten van deze onder-

^[1] Tunnels waar men wel doorheen kan kijken maar waarbij toch ook overdag verlichting noodzakelijk is, zullen we buiten beschouwing laten.
Zie hiervoor D. A. Schreuder, Short tunnels, Int. Lighting Rev. 16, 95-99, 1965 (no. 3).

^[2] Het feit dat er sprake is van twee verschillende stooreffecten, is het eerst opgemerkt door wijlen dr. A. M. Kruithof (Philips techn. T. 10, 299-306, 1948).

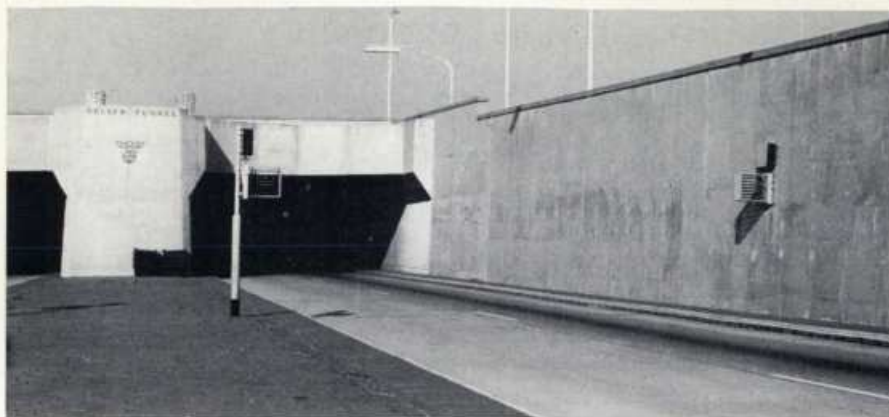


Fig. 1. Een onvoldoend verlichte tunnelingang kan eruitzien als een zwart gat. Een naderende autobestuurder kan de tunnel dan niet inkijken. (Sedert deze foto genomen werd, is de ingang van de onderhavige tunnel sterk verbeterd.)

zoekingen zijn dat het zwarte-gat-effect niet hinderlijk is wanneer de luminantie in het eerste gedeelte van de tunnel niet lager is dan 10% van die erbuiten, en dat de adaptatie geen problemen geeft wanneer voor de overgang van het daglicht naar het laagste luminantieniveau in het inwendige van de tunnel 10 tot 15 seconden ter beschikking staan. Voor een autobestuurder die met een snelheid van 72 km/uur rijdt, corresponderen met deze tijden afstanden van niet minder dan 200 à 300 m.

We zullen in dit artikel een beschrijving geven van het zojuist genoemde onderzoek en de voornaamste conclusies formuleren die uit de resultaten ervan getrokken zijn. Vervolgens beschrijven we in het kort enkele modelproeven die te Eindhoven zijn uitgevoerd en waarbij deze conclusies op hun praktische waarde zijn getoetst. Tot slot geven we een beknopt overzicht van de regels waaraan de verlichting van een tunnelingang moet voldoen^[3], alsmede een korte beschrijving van de volgens deze regels ontworpen ingangsverlichting van de westelijk van Amsterdam onder het Noordzeekanaal in aanbouw zijnde Coentunnel. Alvorens onze proeven over de van belang zijnde adaptatie- en inductieverschijnselen te behandelen, willen we eerst de aard van deze verschijnselen nog wat nauwkeuriger beschrijven, en aantonen dat de adaptatie en de inductie, hoewel ze samenhangen, in ons geval afzonderlijk onderzocht mogen worden.

Het verschil tussen adaptatie en inductie

Onder inductie zullen we in dit artikel verstaan het verschijnsel dat bij een ongelijkmatige luminantieverdeling in het object de gevoeligheid van een netvlieselement niet precies correspondeert met de luminantie van het deel van het object dat daarop is afgebeeld, maar tevens afhangt van de luminantie van andere partijen. Ten dele wordt dit veroorzaakt door verstrooiing van licht in het oog.

De gevoeligheid van elk netvlieselement noemen we de *adaptatietoestand* van dit deel van het netvlies. Een en dezelfde adaptatietoestand van een bepaald netvliesgedeelte kan het resultaat zijn van vele verschillende luminantieverdelingen in het object. Onder deze verdelingen is er uiteraard ook één die gelijkmatig is. De desbetreffende luminantie wordt het bij de adaptatietoestand behorende *adaptatieniveau* genoemd.

Hebben we niet een stationaire toestand, maar verandert de luminantie van het gezichtsveld — of van een gedeelte ervan —, dan moet men een verandering in de inductie-effecten verwachten en bijgevolg óók in de adaptatietoestand. Enige tijd na de verandering zal ieder netvliesgedeelte een nieuwe adaptatietoestand bereikt hebben. De verandering wordt, gelijk bekend is, *adaptatie* genoemd, en de daarvoor vereiste tijd is de *adaptatietijd*.

Wanneer men aanneemt dat men ook tijdens de adaptatie op ieder ogenblik van een adaptatietoestand kan spreken, kan men de adaptatie beschrijven met een opeenvolging van adaptatieniveaus, d.w.z. met het verloop van een fictieve gezichtsveldluminantie. Gedurende de adaptatie wijkt deze fictieve luminantie gewoonlijk af van de feitelijk aanwezige gezichtsveldluminantie; het verschil noemt men het *adaptatiedefect*. Verandert de gezichtsveldluminantie langzaam, dan is het adaptatiedefect gering; verandert de luminantie daarentegen plotseling, dan treedt een aanzienlijk adaptatiedefect op. We zullen ons in het volgende verder uitsluitend bezighouden met wat er gebeurt wanneer de luminantie in een deel van het gezichtsveld plotseling — althans snel — afneemt, zoals in het algemeen het geval is bij de ingang van een tunnel; de adaptatie-effecten bij een tunneluitgang, die veel minder storend zijn, zullen we buiten beschouwing laten.

De betrekkelijk geringe snelheid waarmee de adaptatietoestand van een netvliesgedeelte zich aanpast aan een verandering van de luminantie van het corresponderende deel van het gezichtsveld, is oorzaak van de welbekende nabeelden. Stel b.v. dat iemand kijkt naar een scherm dat in hoofdzaak egaal verlicht is maar waarin één vakje helderder verlicht is. Vervolgens wordt de luminantie van dit vakje gelijk gemaakt aan die van de rest van het scherm. Op het netvliesgedeelte waar het vakje wordt afgebeeld, volgt de adaptatietoestand de verandering van de luminantie niet direct. De gevoeligheid is aanvankelijk dus nog die behorend bij een

hogere luminantie. Kijkt men nu naar het scherm, dan wordt het gedeelte waar kort te voren de luminantie nog hoog was, onder-gewaardeerd; dit betekent dat er zich een donker lichaam van dezelfde vorm schijnt te bevinden. In dit geval spreekt men, om voor de hand liggende redenen, van een negatief nabeeld.

Bij een verandering van de luminantieverdeling in het gezichtsveld verandert in het algemeen ook de inductie. Omdat er bij inductieveranderingen sprake is van een verandering van de netvliesgevoeligheid, is het gerechtvaardigd om ook hier van een adaptatie-effect te spreken. Omdat de gevoeligheid van het gehele netvlies hierbij verandert, althans van een aanzienlijk gedeelte ervan, kan men van de *algemene adaptatie* spreken.

De verandering van de pupildiameter ten gevolge van een verandering in de gezichtsveldluminantie wordt vaak eveneens tot de adaptatie-effecten gerekend. Omdat echter de variaties in de pupildiameter onder praktijkomstandigheden slechts vrij klein zijn, kan de invloed van deze pupilreflex bij beschouwingen over de verlichting van tunnelingangen worden verwaarloosd ^[4].

Voor het naderen van een tunnelingang door een autobestuurder geldt nu, als we ietwat schematiseren, het volgende. Wanneer de autobestuurder zich op een grote afstand van de tunnelingang bevindt, wordt de adaptatietoestand van zijn gezichtsorgaan nog niet door de donkere tunnelingang beïnvloed. Komt hij dichterbij, dan zal op een bepaald ogenblik, ten gevolge van de veranderingen in de luminantieverdeling in het gezichtsveld, een verandering optreden in de adaptatietoestand: de adaptatie begint. Het punt op de weg waar dit gebeurt, zullen we het *adaptatiepunt* noemen. Tot aan het bereiken van het adaptatiepunt blijft de adaptatietoestand van het gehele netvlies onveranderd en wordt een eventuele beperking van de waarnemingsmogelijkheid alléén veroorzaakt door de inductie. Het adaptatieniveau is tot dat ogenblik gelijk aan de gemiddelde gezichtsveldluminantie van het open veld buiten de tunnel. Na het passeren van het adaptatiepunt wordt de beperking van de waarnemingsmogelijkheid uitsluitend veroorzaakt door adaptatie-effecten; het *veranderen* van de inductie is immers eveneens een adaptatie-effect! De inductie- en adaptatie-effecten beperken de waarnemingsmogelijkheid dus niet tegelijkertijd maar na elkaar. Derhalve kan men ze afzonderlijk onderzoeken.

De ligging van het adaptatiepunt en de gezichtsveldluminantie van het open veld voor de tunnelingang zijn twee belangrijke grootheden. Het adaptatiepunt ligt niet voor ieder mens, en zelfs niet bij iedere rit, op precies dezelfde plaats; vaak ligt het niet meer dan enkele tientallen meters voor de tunnelingang. Daar een autobestuurder die met een snelheid van 70 tot

100 km/h rijdt, ten minste 100 m voor zich uit moet kunnen kijken, moet hij dus in de meeste gevallen de tunnel reeds kunnen inkijken vóórdat hij het adaptatiepunt bereikt heeft.

De buitenluminantie bepaalt in hoge mate de hinder die de autobestuurder bij het naderen van de tunnel ondervindt. Dit geldt zowel voor de hinder door de inductie- als voor die door de adaptatie-effecten. Het is dus van belang de hoogst voorkomende waarde van de buitenluminantie te kennen. Uit registraties van het daglicht blijkt, dat in de zomer de verlichtingssterkte, gemeten in het horizontale vlak, tamelijk vaak meer dan 100 000 lux bedraagt. Bij volledige reflexie zou dit overeenkomen met een luminantie van ongeveer 30 000 cd/m². Nu bedraagt de reflexiefactor van de in de buurt van een tunnelingang voorkomende oppervlakken gewoonlijk niet meer dan 0,25. Daarom behoeft men niet met hogere waarden van de luminantie te rekenen dan 8000 cd/m². We zullen deze waarde in het volgende dan ook steeds als het voor de praktijk belangrijke maximum beschouwen.

Inductie

We willen thans de laboratoriumexperimenten beschrijven die te Eindhoven zijn uitgevoerd om na te gaan aan welke eisen de verlichtingsinstallatie van een tunnel moet voldoen om het zwarte-gat-effect te voorkomen. Deze experimenten waren geheel toegespitst op de zichtbaarheid van objecten: er is onderzocht hoe groot de luminantie van een gezichtsveldgedeelte (corresponderend met de tunnelingang) moet zijn om een object dat tegen dit gedeelte afsteekt, te kunnen zien, dit in afhankelijkheid van o.a. het contrast tussen dat object en zijn directe achtergrond. De proeven zijn op een zodanige wijze uitgevoerd dat de adaptatietoestand constant bleef; alleen in dat geval immers heeft men uitsluitend met inductie-effecten te maken, ofwel: alleen in dat geval verkeert de proefpersoon onder omstandigheden die een goede imitatie vormen van de situatie waarin een autobestuurder verkeert die het adaptatiepunt nog niet gepasseerd is. Verderop in dit artikel zal worden aangetoond dat het feit dat in andere opzichten de situatie bij de proefnemingen afwijkt van die op de werkelijke verkeersweg, de uit de proeven afgeleide

^[3] Een uitvoeriger behandeling van dit alles vindt men in: D. A. Schreuder, The lighting of vehicular traffic tunnels, Philips' Technische Bibliotheek, Eindhoven 1964. De uit de onderzoeken afgeleide conclusies zijn ook neergelegd in: Aanbevelingen voor tunnelverlichting, Electro-techniek 41, 23-32 en 46-53, 1963, ook afzonderlijk uitgegeven door de Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde.

^[4] Zie H. Bouma, Receptive systems — mediating certain light reactions of the pupil of the human eye, Diss. Eindhoven 1965; ook verschenen in Philips Res. Repts. Suppl., 1965 no 5.

conclusies omtrent het verlichten van tunnels niet wezenlijk aantast.

Ter beoordeling van de waarnemingsmogelijkheid hebben we een „kritisch” object ingevoerd. We hebben daarvoor gekozen een vierkant object van $20 \times 20 \text{ cm}^2$ dat zich op een afstand van 100 m voor de auto bevindt — op 100 m correspondeert 20 cm met 7 boogminuten — en een zodanige reflexiefactor heeft dat het contrast met de directe achtergrond 20% bedraagt [5]. We hebben de waarnemingsmogelijkheid als voldoende beschouwd wanneer de waarschijnlijkheid dat dit object „in een oogopslag” — d.w.z. in ca. 0,1 s — waargenomen werd, 75% bedroeg. Contrasten van 20% tussen voertuigen en de achtergrond waartegen men ze ziet, komen nog vrij veel voor, kleinere echter zelden. De keus van dit kritisch object en van de waarnemingstijd zijn natuurlijk niet geheel vrij van willekeur. Er zal echter blijken dat de meetresultaten, zelfs als men de diverse parameters aanzienlijk verandert, niet sterk variëren.

De opstelling waarmee de inductie-experimenten zijn uitgevoerd, vindt men schematisch weergegeven in fig. 2. Een door de lampen V_1 verlicht scherm S met luminantie L_1 bepaalde de adaptatie (adaptatie-niveau = L_1). Een sluiters B in dit scherm kon gedurende een

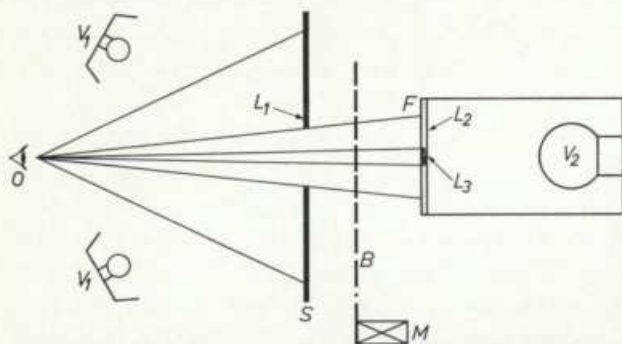


Fig. 2. De opstelling voor de inductieproeven. S groot scherm verlicht door de lampen V_1 , met luminantie L_1 ; deze luminantie bepaalt het adaptatieniveau van het oog O van de proefpersoon. B sluiters, gedreven door de motor M , die iedere zes seconden gedurende 0,1 s een binnenveld met luminantie L_2 vrijgeeft, waarin zich een object bevindt met luminantie L_3 (zie ook fig. 3). Het binnenveld wordt verkregen door een neutraal filter F te verlichten met de lamp V_2 .

korte tijd een binnenveld met luminantie L_2 vrijgeven waarin zich een object met luminantie L_3 bevond (fig. 3). Was de sluiters dicht, dan was ter plaatse van het binnenveld de luminantie eveneens L_1 . Het binnenveld met object werd verkregen door middel van een glasplaat F waarop, door opdampen in vacuüm, een neutraal filter was aangebracht. Ter plaatse van het object was de doorlating daarvan wat geringer dan elders. Dit filter werd van achteren verlicht door de lamp V_2 . De sluiters draaide rond en werd gedreven door een synchroonmotor M . Iedere zes seconden was het binnenveld gedurende de genoemde 0,1 s zichtbaar. Deze tijd is kort

genoeg om te voldoen aan de eis dat er geen adaptatie mag optreden. Het variëren van L_1 en L_2 geschiedde grof met behulp van neutrale filters en fijn door variatie van de brandspanning van de lampen. (Een sterke variatie realiseren uitsluitend door verandering van de brandspanning geeft een te grote kleurverandering.) Daar de verhouding L_2/L_3 uitsluitend van het filter af-

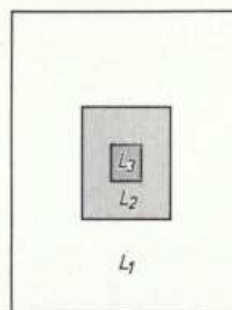


Fig. 3. Schematische voorstelling van het gezichtsveld van de proefpersoon bij geopende sluiters. Hij ziet een object met luminantie L_3 tegen een achtergrond met luminantie L_2 . De luminantie L_1 van het scherm bepaalt de adaptatie.

hing, gaf variatie van de verlichting van het filter F géén verandering in contrast. Om te kunnen nagaan in hoeverre de resultaten bepaald waren door de keus van het kritisch object, zijn er diverse filters F gebruikt met onderling verschillende verhouding L_2/L_3 — dat wil dus zeggen: er is gemeten met verschillende contrasten tussen object en achtergrond. Men vindt de opstelling afgebeeld in fig. 4.

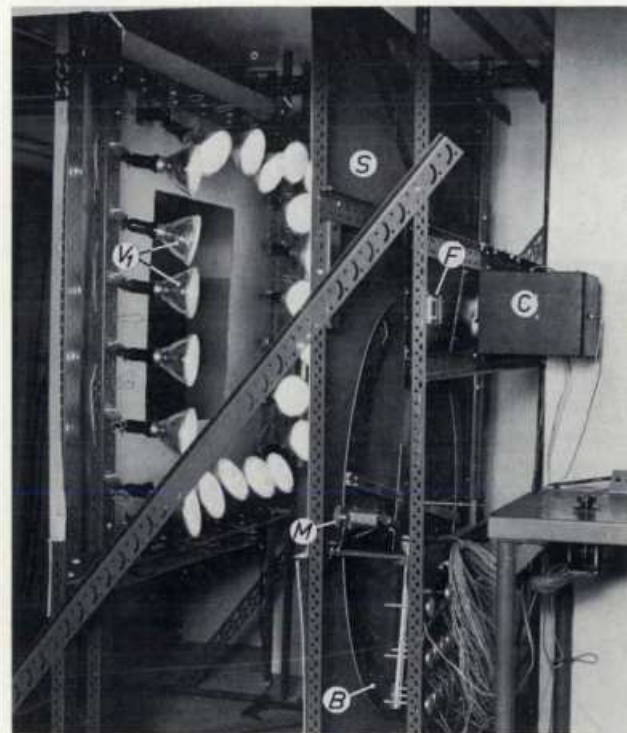


Fig. 4. Overzicht van de opstelling van fig. 2. In het midden het scherm S . Links de lampen V_1 die dit scherm verlichten. Rechts van S de roterende sluiters B met de motor M , de houder voor de filters F en de kast C waarin zich de lamp V_2 (fig. 2) bevindt. Geheel rechts een deel van het bedieningspaneel. De proefpersoon (niet zichtbaar op de foto) zit links.

Bij de metingen werd steeds begonnen met de proefpersoon geruime tijd (ca. 5 min) naar het scherm met gesloten sluiters te laten kijken. Wanneer volledige adaptatie had plaatsgevonden, werd de sluiters een aantal malen geopend. Bij één meetserie werd met dezelfde glasplaat F gewerkt — constant contrast tussen object en achtergrond — maar de luminantie L_2 werd gevarieerd; iedere waarde van L_2 kwam in een serie vijf maal voor. De proefpersoon moest nu bij iedere expositie laten weten of hij het object gezien had of niet. Een verschil met de situatie op de weg was natuurlijk dat de waarnemer wist waar het object was en hoe het eruitzag, zodat hij niet behoefde te zoeken. Door de uit iedere meetserie verkregen punten (meestal 25 à 35) is volgens de regels van de statistiek een kromme getrokken (een zg. regressiekromme) die weergaf hoe het percentage positieve antwoorden afhing van L_2 . Uit deze krommen zijn de waarden van L_2 afgeleid die hoorden bij een waarnemingskans p van 50% resp. van 75%. Soortgelijke series zijn uitgevoerd voor een aantal andere waarden van L_1 en een aantal andere contrasten, dit alles met tien proefpersonen.

De resultaten ^[6] voor $p = 75\%$ vindt men samengevat in fig. 5. In deze figuur is uitgezet de

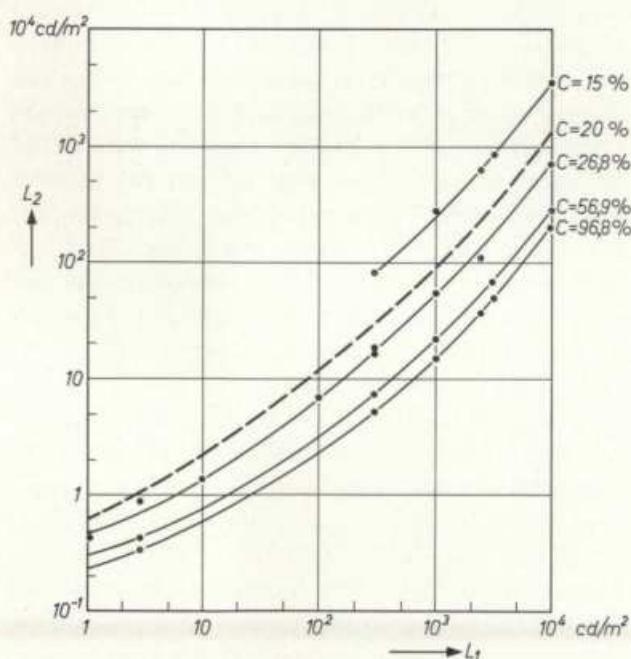


Fig. 5. Resultaten van de metingen betreffende de inductie. De waarde van de luminantie L_2 die in 75% van de gevallen nodig was om het object binnen 0,1 s te kunnen zien, is uitgezet als functie van de scherm luminantie L_1 met als parameter het contrast C . De waarden voor het kritisch object ($C = 20\%$, hoekafmeting 7') zijn gevonden door interpolatie.

minimumwaarde van L_2 die bij een adaptatieniveau L_1 nodig is om in 75% van de gevallen een object waar te kunnen nemen. De curven gelden voor de bijgeschreven waarden van het contrast C . Twee

belangrijke conclusies kunnen worden getrokken:

- 1) Om een object dat een contrast van 20% met zijn achtergrond vormt, te kunnen zien, moet bij $L_1 = 8000 \text{ cd/m}^2$ de luminantie L_2 in het begin van de tunnel ca. 1000 cd/m^2 bedragen.
- 2) In een aanzienlijk gebied van L_1 -waarden is de minimumwaarde van L_2 ruwweg evenredig met L_1 ; bij benadering geldt: $L_2 = 0,1 L_1$. Dit laatste is vooral van belang omdat eruit blijkt dat er geen bezwaar tegen bestaat de door de traagheid van de adaptatie vereiste geleidelijke overgang in luminantie deels te realiseren met behulp van voor de tunnelingang aangebrachte, het daglicht temperende roosters. Deze hebben immers een constante doorlatings, hetgeen betekent dat bij gebruik van zo'n rooster L_2 steeds dezelfde fractie van L_1 is.

Een belangrijke vraag is in hoeverre deze resultaten veranderen wanneer men een ander kritisch object kiest of wanneer de overige proefomstandigheden anders zijn. Gelukkig blijkt bij de meeste parameters zelfs een vrij aanzienlijke variatie weinig invloed hebben. Op grond daarvan mag men concluderen dat met deze figuur inderdaad het zwarte-gat-effect mag worden beschreven. We zullen nu in het kort de invloed van de verschillende parameters bespreken.

Neemt men genoeg met een zichtbaarheidskans van 50% in plaats van 75%, dan mag L_2 ca. 20% lager zijn. Neemt men een object dat *lichter* is dan zijn achtergrond (negatief contrast), dan blijft voor niet te grote contrasten de minimumwaarde van L_2 ongeveer gelijk. Is de *hoek* waaronder het object wordt gezien viermaal zo groot (28' in plaats van 7'), dan mag L_2 gemiddeld ca. 30% kleiner zijn. Wordt de *expositietijd* driemaal zo lang gekozen (0,3 s in plaats van 0,1 s), dan mag L_2 gemiddeld ca. 40% lager zijn. (Kiest men de expositietijd nóg langer, dan is niet meer voldaan aan de voorwaarde van constante adaptatie, zodat resultaten gevonden worden die met de onze niet direct vergelijkbaar zijn ^[7].) Ten slotte de invloed van het *contrast* op de minimumwaarde van L_2 : blijkens fig. 5 is deze invloed alleen van enig belang wanneer het kleine contrasten betreft. Bij contrasten van 20% of meer is ook de invloed van C betrekkelijk gering: kiest men b.v. voor het contrast van het kritisch object niet

^[5] Onder contrast zullen we verstaan het verschil van de luminanties van object en achtergrond, gedeeld door de luminantie van de achtergrond. We drukken deze verhouding uit in %.

^[6] Zie hiervoor ook: J. B. de Boer, Untersuchungen der Sehverhältnisse bei Tunnelleinfahrten, *Lichttechnik* 15, 125-127, 1963, alsmede: D. A. Schreuder, Contrast sensitivity in test field with bright surround, *J. Opt. Soc. Amer.* 55, 729-731, 1965 (no. 6).

^[7] Zie b.v. R. O. Schumacher, Die Unterschiedsempfindlichkeit des helladaptierten menschlichen Auges, Diss. T. H. Berlin 1942, en E. Kern, Der Bereich der Unterschiedsempfindlichkeit des Auges bei festgehaltenen Adaptationszustand, *Z. Biol.* 105, 237-245, 1952.

20% maar 25% — gezien de frequentie van het voorkomen van de diverse C -waarden een grote verandering — dan neemt L_2 ca. 40% af.

Uit het bovenstaande blijkt duidelijk dat, zoals we stelden, de conclusies omtrent de minimumeisen waaraan de verlichting van een tunnelingang moet voldoen om het zwarte-gat-effect te vermijden, niet al te zeer afhangen van de keus van het kritisch object. Deze keus was dus blijkbaar gerechtvaardigd. De praktische consequenties van de geschetste resultaten behandelen we in het slothoofdstuk.

Sommige onderzoekers nemen aan dat bij verblinding de vermindering van de waarnemingsmogelijkheid van contrasten alleen het gevolg is van lichtverstrooiing in het oog^[8]. Met deze theorie kan men echter de vorm van de krommen van fig. 5 niet volledig verklaren. De lichtverstrooiing zal immers evenredig zijn met L_1 , en hetzelfde zou moeten gelden voor de vermindering van de genoemde waarnemingsmogelijkheid. Men zou dan in het diagram van fig. 5 rechte lijnen met een helling van 45° moeten vinden. De lijnen in fig. 5 wijken echter significant van rechte lijnen af. Dit betekent dat bij de hier beschreven inductieverschijnselen, behalve strooilicht ook adaptatie-effecten een rol spelen. Welke effecten dit zijn, is op grond van onze proeven natuurlijk niet uit te maken.

In de literatuur zijn geen proeven beschreven, waarmee de hierboven beschreven proeven direct kunnen worden vergeleken. Er bestaat echter een zekere analogie tussen de resultaten van fig. 6 en die van Schumacher^[9] en Lythgoe^[10].

Adaptatie

Wanneer een autobestuurder het adaptatiepunt is gepasseerd, wordt de gevoeligheid van zijn visuele systeem beïnvloed door de aanwezigheid van de donkere tunnelingang. In de inleiding hebben we uiteengezet dat de verschijnselen die dan optreden, moeten worden onderscheiden in 1) een verandering van de adaptatietoestand van beperkte delen van het netvlies (de plaatselijke adaptatie) en 2) een verandering in de inductie (de algemene adaptatie). Vooral wanneer de façade van de tunnelingang licht gekleurd is, ligt het adaptatiepunt op geringe afstand van de ingang en beginnen deze processen pas vlak voordat men de tunnel binnengaat.

Nu hebben de inductieverschijnselen een geringe nawerking: de algemene adaptatie verloopt zeer snel. Wat dit betreft heeft een plotselinge verlaging van het luminantieniveau dus geen al te nadelige invloed op de waarneembaarheid van objecten. De plaatselijke adaptatie daarentegen verloopt, zoals we gezien hebben, langzaam, zodat er bij snelle locale veranderingen van de luminantie nabeelden optreden^[11]. Deze verdwijnen slechts langzaam, beslaan in de praktijk grote delen van het gezichtsveld en kunnen daardoor de duidelijkheid van het beeld van de weg ernstig schaden.

Onze adaptatieproeven waren zo ingericht dat vooral het tweede effect, het verdwijnen van nabeelden,

onderzocht kon worden. Ze waren gebaseerd op het principe van de subjectieve beoordeling van luminantie-veranderingen. Steeds is gebruik gemaakt van variaties in de luminantie van het gezichtsveld, zodat ook de invloed van de variatie van de algemene adaptatie en die van de pupil-aanpassing ten volle tot hun recht konden komen. Dit betekent dat in feite het adaptatiedefect gemeten werd. Verder waren de proeven zo ingericht dat uit de resultaten ervan direct kwantitatieve eisen omtrent de verlichting van een tunnelingang konden worden afgeleid. Er zijn twee methodes gevolgd. Bij de eerste methode is nagegaan hoeveel tijd er na een plotselinge sterke vermindering van de gezichtsveldluminantie nodig is voordat het adaptatiedefect tot een acceptabele graad is afgenomen — ofwel: hoeveel tijd er verloopt voordat de nabeelden verdwenen zijn. Bij de tweede methode is nagegaan hoe snel en volgens welk verloop de luminantie mag afnemen zonder dat het adaptatiedefect te groot wordt. In beide gevallen is uitgegaan van een luminantieniveau van ten minste 8000 cd/m^2 ; dit is immers de voor de praktijk belangrijke maximumwaarde van de luminantie in het open veld.

Bij de metingen volgens de eerste methode werd een scherm van ca. 6 m^2 gelijkmatig verlicht met een luminantie van 8000 cd/m^2 . Dit scherm werd van een afstand van ca. 5 m bekeken. Na een vooradaptatie van ca. twee minuten werd de luminantie op een aan de waarnemer bekend ogenblik binnen een tijd van 10 ms verminderd tot 13 cd/m^2 . Gemeten werd de tijd die vanaf dit ogenblik verliep tot aan het moment waarop de proefpersoon meldde dat de nabeelden tot een acceptabele graad waren afgenomen. Deze nabeelden besloegen uiteraard een aanzienlijk deel van het gezichtsveld. De proef is door ieder van tien proefpersonen tienmaal uitgevoerd; de resultaten ervan vindt men weergegeven in fig. 6.

Voor de proeven volgens de tweede methode was de meetopstelling in beginsel dezelfde. Nu echter kon de luminantie van het scherm door de proefpersoon zelf worden geregeld. Deze kreeg de opdracht de luminantie zo snel mogelijk van 8000 cd/m^2 tot ca. 4 cd/m^2 te doen afnemen zonder dat hinder door nabeelden ontstond. Ook deze proef is door tien proefpersonen uitgevoerd en door ieder tienmaal herhaald. Steeds werd het verloop van de luminantie van het scherm geregistreerd. Het luminantieverloop, dat in 75% van de waarnemingen als acceptabel werd beschouwd, is weergegeven in fig. 7.

In deze figuur is ook het resultaat opgenomen van de proeven volgens de eerste methode; dit is het punt 1. Zoals men ziet, ligt dit punt dicht bij de kromme, dit ondanks het feit dat in het ene geval met een plotselinge en in het tweede geval met een geleidelijke overgang

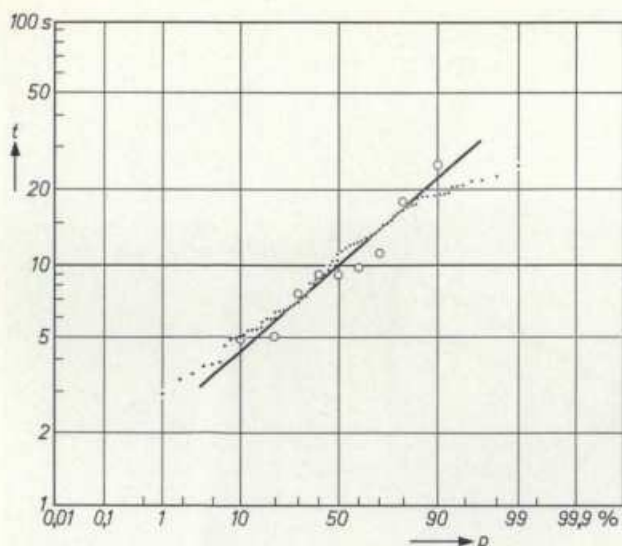


Fig. 6. De uitkomsten van de adaptatieproeven. Verticaal is uitgezet de tijd t na welke de nabeelden in voldoende mate waren afgenomen, horizontaal het percentage p van de gevallen waarin t gelijk was aan de ordinatwaarde of groter (zg. cumulatieve frequentieverdeling). De getrokken curve geldt voor de proeven waarbij de luminantie abrupt verminderd werd van 8000 tot 13 cd/m^2 (cirkelvormige meetpunten). De reeks stippen is afgeleid uit die van fig. 7 en geldt voor de proeven waarbij een geleidelijke vermindering van de luminantie plaatsvond van 8000 cd/m^2 tot 13 cd/m^2 .

van de luminantie gewerkt is. Omgekeerd zijn in fig. 6 ook de resultaten van de tweede proevenserie opgenomen en wel in de vorm van een cumulatieve frequentieverdeling van de adaptatietijden voor een overgang

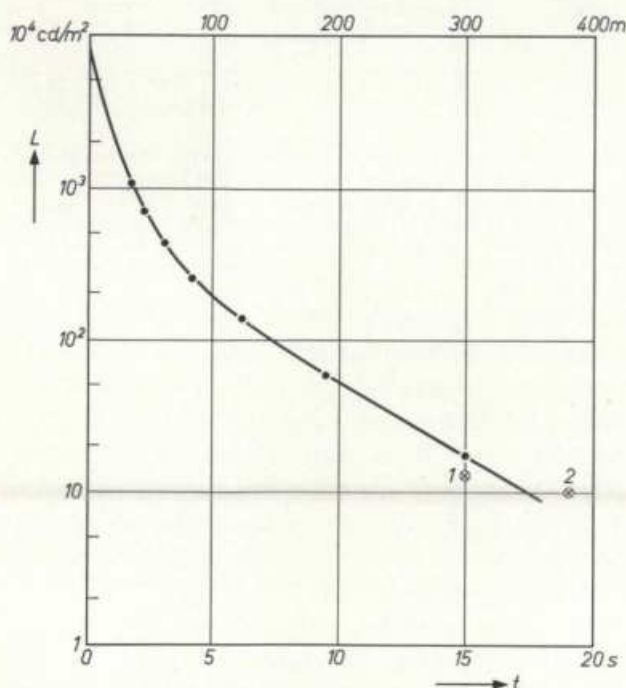


Fig. 7. Het resultaat van de adaptatieproeven volgens de tweede methode. De kromme geeft aan op welke wijze de luminantie kan afnemen zonder hinder door nabeelden te veroorzaken. Punt 1 is afgeleid uit fig. 6, punt 2 geeft het resultaat van modelproeven weer. De lengteschaal geldt voor een snelheid van 72 km/uur (d.i. 20 m/s).

van 8000 naar 13 cd/m^2 . Ook hier is de overeenkomst treffend. Men kan de resultaten van de adaptatieproeven als volgt samenvatten.

- 1) Voor een overgang van 8000 cd/m^2 naar 13 cd/m^2 (normale waarden voor de open weg respectievelijk voor een goed verlicht tunnelinterieur) is ca. 15 s nodig. (Bij een snelheid van 72 km/h legt men in die tijd 300 m af.)
- 2) De uiteindelijk voor de adaptatie vereiste tijd hangt alleen af van het begin- en het eindniveau van de luminantie, en wordt dus niet beïnvloed door het luminantieverloop.

De praktische waarde van de experimentele resultaten; modelproeven

Evenals de inductieproeven zijn ook de zojuist beschreven adaptatieproeven uitgevoerd met opstellingen die sterk van een echte tunnel afwijken. De vraag is dus gewettigd of de resultaten ervan onverkort van toepassing zijn op de tunnelingang. Om hieromtrent zekerheid te krijgen, hebben we enige van de proeven herhaald met een opstelling die beschouwd kan worden als een model (schaal 1 : 20) van het ingangsgedeelte van een lange tunnel; het is immers niet mogelijk dergelijke proeven op ware grootte te doen ^[12]. Het model vindt men afgebeeld in fig. 8, het gezichtsveld van de proefpersoon in fig. 9. In de opstelling was een aantal verlichtingssystemen aangebracht waarmee de overgang van de open weg naar de tunnel kon worden nabootst. Deze overgangsverlichtingen konden in een willekeurige volgorde aan de proefpersoon worden vertoond. Bij alle proeven waren de waarden van het beginniveau buiten de tunnel en het eindniveau in het tunnelinterieur resp. 5000 cd/m^2 en 10 cd/m^2 . De voor de overgang beschikbare tijd kon gevarieerd worden tussen 3 en 21 seconden. Bij iedere rit moest de proefpersoon melden of hij hinder door nabeelden had ondervonden, of niet. De resultaten vindt men samengevat in fig. 10. In deze figuur is het percentage gunstige antwoorden uitgezet tegen de duur t van de rit. De waarde van t waarbij dit percentage 75% bedroeg, is

[8] Zie b.v. J. J. Vos, On the mechanism of glare, Diss. Utrecht 1963.

[9] Zie de aangehaalde dissertatie [7].

[10] R. J. Lythgoe, The measurement of visual acuity, Sp. Rep. Ser. Med. Res. Comm. 173, Londen 1932.

[11] Een dergelijke splitsing in twee processen waarvan er één snel en één langzaam verloopt, is het eerst gemaakt door J. F. Schouten (Diss. Utrecht 1937, blz. 16). Zie ook R. M. Boynton en N. D. Miller, Visual performance under conditions of transient adaptation, Illum. Engng. 58, 541-550, 1963.

[12] Behalve in het in [9] aangehaalde boek vindt men deze opstelling beschreven in J. J. Balder en D. A. Schreuder, Problems in tunnel lighting, Int. Lighting Rev. 10, 24-26, 1959.

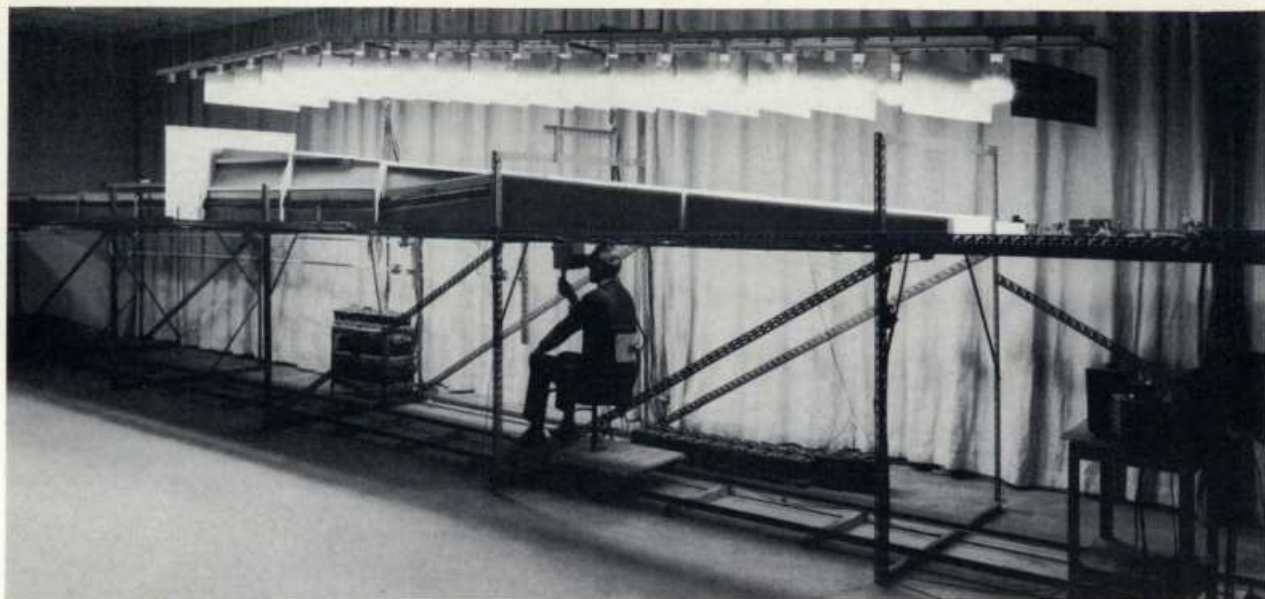


Fig. 8. Opstelling voor modelproeven (schaal 1 : 20). De proefpersoon rijdt onder het wegdek door. Door middel van een periscoop kan hij op de weg kijken en ziet deze dan alsof hij in een auto zat (zie fig. 9). Op het wegdek is het model van de tunnelingang geplaatst. De lampen daarboven simuleren het daglicht. Geheel links bevindt zich de gesloten tunnelbuis.

ook de abscis van het punt 2 in fig. 7; de ordinaat van dit punt is de bij de onderhavige proeven gekozen eindluminantie (10 cd/m^2). Uit een vergelijking van de kromme van fig. 7 en de punten 1 en 2 blijkt dat er tussen alle resultaten een behoorlijke onderlinge overeenstemming bestaat. Een verdere bevestiging van de betrouwbaarheid van onze resultaten is te vinden in de proeven van Kabayama die hieronder ter sprake komen.

Een ander punt dat nader beschouwd moet worden, is de vraag hoe het verloop van de adaptatie is wanneer

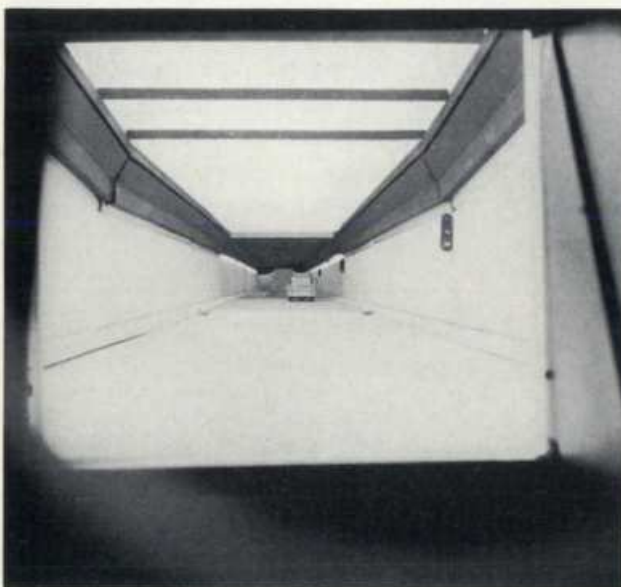


Fig. 9. Het gezichtsveld van de proefpersoon bij een modelproef.

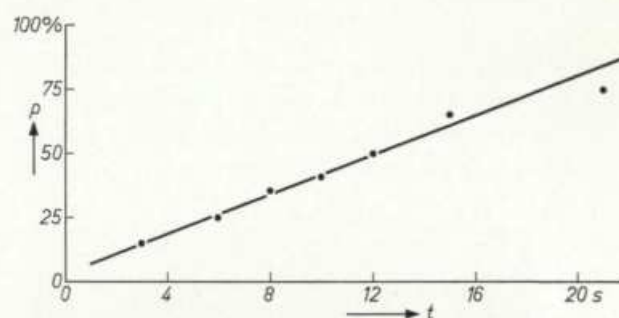


Fig. 10. Het resultaat van de adaptatieproeven met het model. Uitgezet is het aantal keren p (in %) dat een overgang van 5000 naar 10 cd/m^2 als acceptabel werd beoordeeld in afhankelijkheid van de voor de overgang beschikbare tijd t . De waarde van t die correspondeert met $p = 75\%$, is de abscis van het punt 2 in fig. 7.

niet wordt uitgegaan van 8000 cd/m^2 , maar van een ander luminantieniveau. Deze vraag kan beantwoord worden aan de hand van de door Kabayama^[13] beschreven proefnemingen. Daarbij is een meetopstelling gebruikt in grote lijnen gelijk aan die welke wij hebben gebruikt voor onze adaptatiemetingen volgens methode 2 (vgl. fig. 7). Als criterium gold het gedeeltelijk zichtbaar blijven van een test-object. Zijn resultaten vindt men weergegeven in de krommen $1 \text{ t/m } 6$ van fig. 11. Deze krommen gelden voor het in de tabel voor ieder vermelde pre-adaptatieniveau en zijn alle gebaseerd op metingen aan drie proefpersonen. De krommen 7 en 8 in deze figuur representeren onze resul-

[13] H. Kabayama, Study on adaptive illumination for sudden change of brightness (Japans met Engelse samenvatting), J. Illum. Engng. Inst. Japan 47, 488-496, 1963.

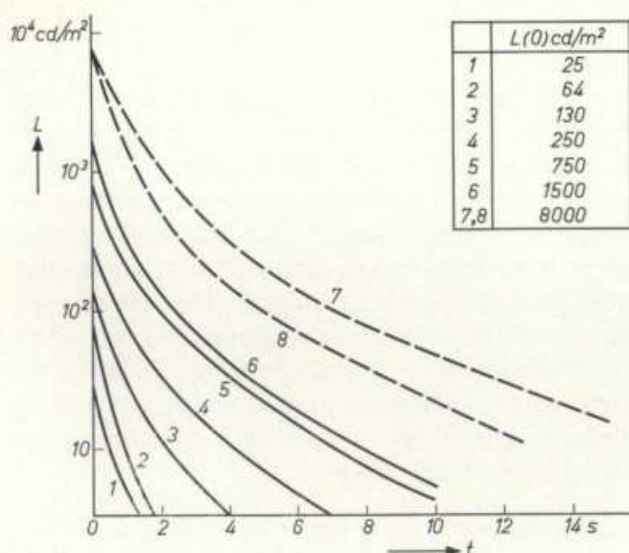


Fig. 11. Toelaatbaar luminantieverloop bij verschillende waarden van het pre-adaptatieniveau (zie de tabel). De krommen 1 t/m 6 geven het resultaat weer van proeven van Kabayama^[13] waarbij als criterium gold het gedeeltelijk zichtbaar blijven van een test-object. Kromme 7 is die van fig. 7 en kromme 8 is de door ons gevonden kromme die geldt voor een percentage acceptabel geachte overgangstijden van 50%.

taten. In fig. 12 zijn dezelfde resultaten nogmaals uitgezet, maar nu met het *relatieve* luminantieverloop als ordinaat; alle krommen beginnen in hetzelfde punt. Zoals men ziet, vertonen de krommen van Kabayama en die van ons alle hetzelfde verloop. Hieruit volgt ten eerste dat het relatieve luminantieverloop niet afhangt van het uitgangsniveau en ten tweede dat de metingen van Kabayama en die van ons onderling goed overeenstemmen.

Verlichtingstechnische consequenties; de Coentunnel

We zullen nu nagaan hoe men op grond van de hierboven vermelde resultaten de ingangsverlichting van een tunnel moet inrichten. In de eerste plaats moet, om

het zwarte-gat-effect te voorkomen, de luminantie in het beginstuk van de tunnel niet lager zijn dan ca. 10% van de luminantie buiten de tunnel. Dit gedeelte van de

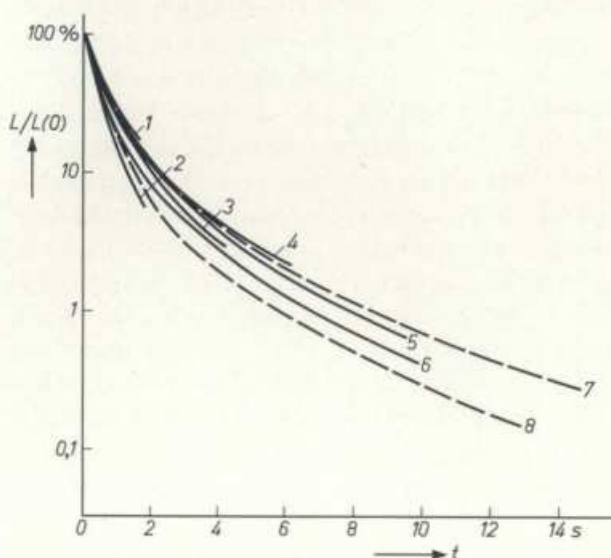


Fig. 12. Reduceert men de ordinaatwaarden van de krommen van fig. 11 op een gelijke beginwaarde, dan krijgt men krommen die bijna samenvallen.

tunnel wordt de *drempelzone* genoemd; zie fig. 13. Aangezien de objecten op een afstand van 60 tot 100 m gezien moeten kunnen worden, moet deze drempelzone zich uitstrekken tot 80 à 120 m voorbij het adaptatiepunt, er moet nl. ook nog ca. 20 m verlicht wegdek zijn waartegen de objecten kunnen afsteken. Omdat het adaptatiepunt meestal op enige tientallen meters voor de tunnelingang ligt, behoeft de drempelzone gewoonlijk niet langer dan ca. 50 m te zijn. (Ter vermindering van misverstand: onder tunnelingang verstaan we van nu af het punt waar de luminantie begint af te nemen; bij een tunnel met roosters die het daglicht temperen, dus het punt waar de roosters beginnen.)

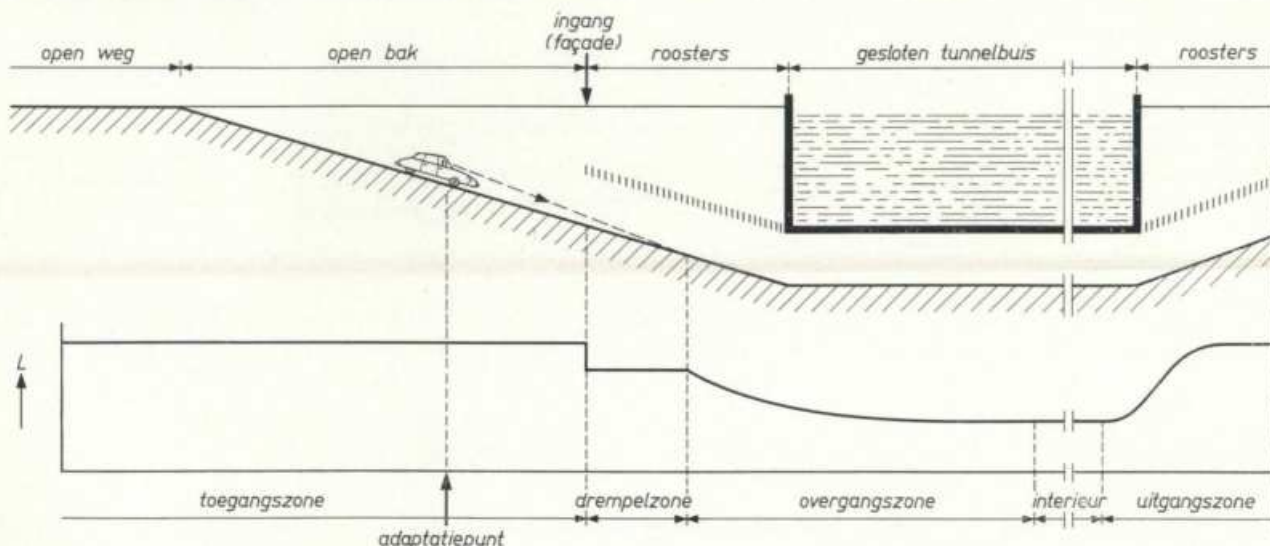


Fig. 13. De zones waarin een weg naar en door een tunnel verdeeld wordt, uit bouwkundig oogpunt (boven), en uit verlichtingstechnisch oogpunt (onder). Het geschetste luminantieverloop vindt men nauwkeuriger in fig. 14.

Achter de drempelzone ligt de *overgangszone*. Dit is het gebied waarin de luminantie af moet nemen tot die van het tunnelinterieur. Een autobestuurder die ongeveer 100 m voor zich uit kijkt, laat zijn blik op het begin van de overgangszone vallen juist als hij het adaptatiepunt passeert, d.w.z. op een ogenblik van waaraf de inductie buiten beschouwing kan blijven. Het luminantieverloop in de overgangszone moet dus gelijkvormig zijn met dat van fig. 7; het begin ervan moet aansluiten op de buitenluminantie. Het gehele luminantieverloop binnen de vier van belang zijnde zones — de open weg, de drempelzone, de overgangszone en het tunnelinterieur — vindt men weergegeven in fig. 14. Bij dit luminantieverloop worden, bij een rijsnelheid van 72 km/uur, zowel de moeilijkheden van het zwartegat-effect als die van de adaptatie vermeden. Zoals men ziet, zijn de drempel- en overgangszone samen enige honderden meters lang, hoewel het niveau in

het tunnelinterieur geenszins laag is gekozen (ruim 10 cd/m^2).

Uit het oogpunt van verlichtingstechniek is het niet belangrijk of de vereiste luminantie verkregen wordt met kunstlicht of op een andere manier. In de meeste gevallen blijkt de economisch optimale oplossing gevonden te worden wanneer de drempelzone alsmede het eerste stuk van de overgangszone verlicht worden met door een rooster getemperd daglicht. De toepassing van getemperd daglicht heeft bovendien als voordeel dat bij veranderingen in het lichtniveau buiten de tunnel het relatieve luminantieverloop niet verandert, zodat — zoals we gezien hebben — optimale visuele omstandigheden gehandhaafd blijven.

Dergelijke roosters moeten aan verscheidene eisen voldoen, waarvan we de belangrijkste twee zullen noemen. In de eerste plaats moeten ze open zijn, zodat sneeuw en regen er doorheen kunnen vallen. In de tweede plaats moeten de elementen ervan zodanig zijn gedimensioneerd dat onder geen enkele omstandigheid het zonlicht rechtstreeks op het wegdek kan vallen. Om aan deze laatste eis te voldoen en toch een lichtdoorlating van 10% te bereiken, moet men materiaal gebruiken dat sterk reflecteert, maar het mag uiteraard niet spiegelen ^[14].

De Coentunnel

We willen dit artikel besluiten met een korte beschrijving van de ingangsverlichting van de in aanbouw zijnde Coentunnel ^[15]. In grote lijnen zal het luminantieverloop in deze tunnel aan de hierboven beschreven eisen voldoen. De toegepaste constructie vindt men geschetst in fig. 15. Vanaf ongeveer 150 m voor de ingang van de gesloten tunnelbuis is er, op ongeveer constante hoogte boven het wegdek, een rooster van aluminium (fig. 16). Dit ontvangt zijn licht via een ter hoogte van het aardoppervlak gelegen sleuf, die geleidelijk nauwer wordt. De doorlating van

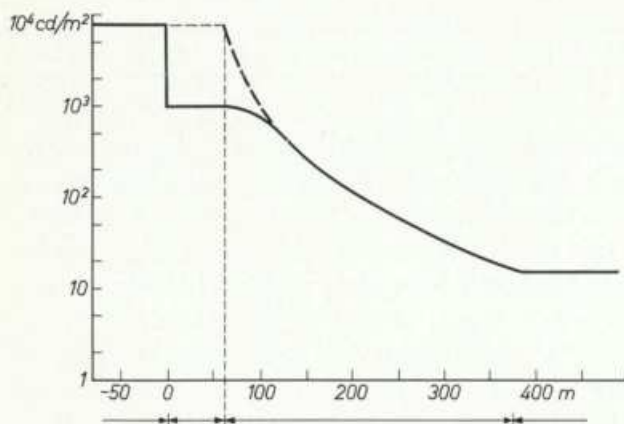


Fig. 14. Het verloop van de luminantie bij de ingang van een verkeerstunnel dat bij een rijsnelheid van 72 km/uur noodzakelijk is om hinder door het zwartegat-effect en door nabeelden te voorkomen.

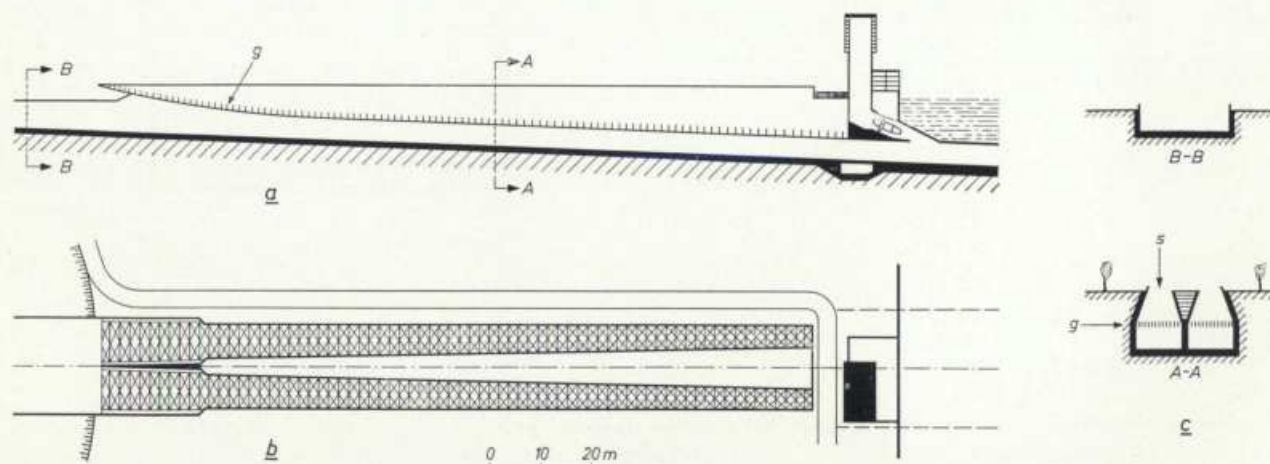


Fig. 15. Het ingangsgedeelte van de Coentunnel onder het Noordzeekanaal (volgens Grifioen ^[15]). a) Langsdoorsnede. b) Boven-aanzicht. c) Twee dwarsdoorsneden. Op ongeveer constante hoogte boven het wegdek bevindt zich een rooster *g* dat zijn licht ontvangt via een spleet *s* die geleidelijk nauwer wordt.

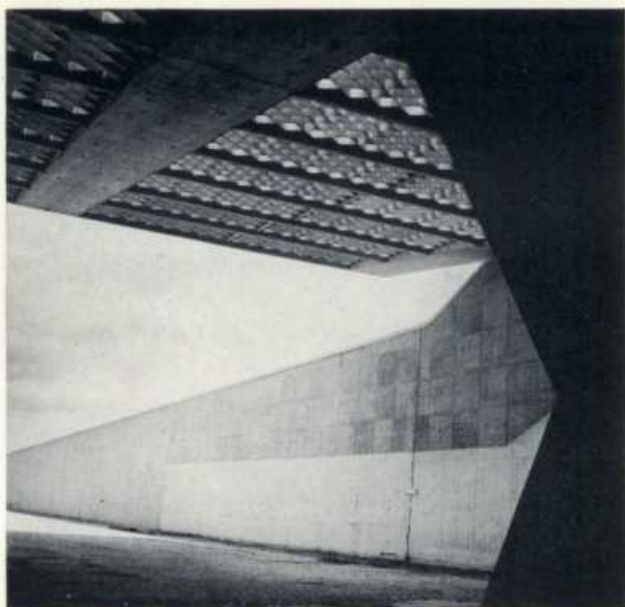


Fig. 16. Noordelijke ingang van de Coentunnel. Men ziet duidelijk de roosters.

het rooster zelf is ongeveer 30%. Door deze constructie wordt bereikt dat de luminantie van het wegdek geleidelijk afneemt. Aan het begin van de gesloten tunnelbuis wordt over een lengte van ca. 70 m een extraverlichting aangebracht, waarmee een luminantie van ca.

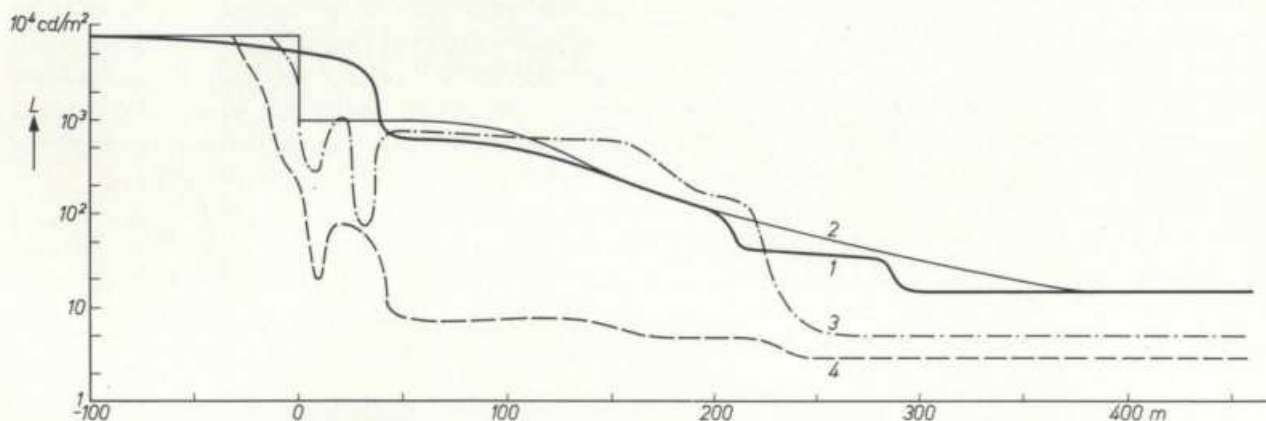


Fig. 17. Het te verwachten luminantieverloop bij de ingang van de Coentunnel (kromme 1). Ter vergelijking zijn tevens in de figuur opgenomen de kromme van fig. 14 (kromme 2) alsmede het gemeten luminantieverloop bij de tunnels te Velsen en Rotterdam (resp. kromme 3 en kromme 4).

30 cd/m² bereikt kan worden. De luminantie in het interieur zal ca. 15 cd/m² bedragen. Het kunstlicht wordt verkregen met regelbare „TL” lampen; de sterkte ervan wordt door een door fotowerstanden bestuurde thyristorschakeling automatisch aangepast bij het lichtniveau dat buiten de tunnel heerst.

In fig. 17 is weergegeven hoe het te verwachten luminantieverloop eruitziet (kromme 1). Ter vergelijking zijn ook opgenomen de kromme van fig. 14 die het luminantieverloop geeft dat blijkens onze experimenten wenselijk is (kromme 2), alsmede de resultaten van metingen in de tunnels te Velsen (onder het Noordzeekanaal, geopend in 1956; kromme 3) en Rotterdam (onder de Maas, geopend in 1942; kromme 4). De gemeten krommen zijn horizontaal zo ten opzichte van kromme 2 verschoven dat ze er het best bij aansluiten. Zoals men ziet, wordt met de voorgestelde verlichting van de Coentunnel een luminantieverloop verkregen dat dat van fig. 14 dicht benadert. Vergelijkt men de situatie bij de drie tunnels, dan blijkt duidelijk hoe de eisen van het verkeer geleid hebben tot een stijging van de kwaliteit van de verlichting.

[14] Voor verdere bijzonderheden zie men: D. A. Schreuder, Über die Beleuchtung von Straßenverkehrstunneln, Lichttechnik (ter perse).

[15] Zie hiervoor ook: A. Griffioen, De Coentunnel, III. De ventilatie en verlichting, Ingenieur 75, B 213 - B 224, 1963.

Samenvatting. Een autobestuurder die een onvoldoend verlichte ingang van een lange tunnel nadert, ondervindt aanvankelijk uitsluitend hinder door inductie-effecten (zwarte-gat-effect). Vervolgens, nadat hij het punt waar de adaptatie begint (het adaptatiepunt) gepasseerd is, uitsluitend door adaptatieverschijnselen, vooral nabeelden. Blijkens laboratoriumexperimenten omtrent de inductie wordt het zwarte-gat-effect vermeden wanneer de luminantie L_2 in de tunnelingang groter is dan 10% van de buitenluminantie L_1 . Deze evenredigheid rechtvaardigt het realiseren van de ingangsverlichting door middel van roosters die het daglicht temperen. De hinder door nabeelden is onderzocht door plotseling de luminantie van een groot scherm te verminderen, en

na te gaan na hoeveel tijd de nabeelden niet hinderlijk meer waren, alsook door de proefpersoon zelf de luminantie te laten variëren. Daaruit is het gunstigste luminantieverloop afgeleid. Bij een begin- en eindwaarde van 8000 resp. 13 cd/m² is de voor de adaptatie vereiste tijd steeds ca. 15 s (d.i. bij 72 km/uur op de weg 300 m). Modelproeven bevestigden de resultaten. Licht het adaptatiepunt 50 m voor de ingang en is $L_1 = 8000$ cd/m², dan moet er in de tunnel eerst een zone van 50 m zijn waar $L_2 \approx 1000$ cd/m². Vervolgens een overgangszone, waarin L_2 volgens het experimenteel bepaalde verloop afneemt met als beginwaarde (geëxtrapoleerd) L_1 (fig. 14). De geprojecteerde verlichting van de Coentunnel bij Amsterdam voldoet ongeveer aan deze eisen.

Een toestel voor automatische belichting in de röntgendiagnostiek

H. Elgström en E. Zieler

621.386.8

De röntgentechniek is van ouds een vak waarin de resultaten van vele andere gebieden worden toegepast — van de geneeskunde, de fysica, de optica, zelfs de werktuigbouw. Ook de elektronentechniek draagt thans op allerlei wijzen bij tot de ontwikkelingen op röntgengebied. De hier gegeven beschrijving van een belichtingsautomaat illustreert het samenspel van fysische overwegingen en elektronische kunstgrepen.

De taak van een belichtingsautomaat

In vrijwel alle takken van de techniek krijgt de automatisering een steeds grotere betekenis. Daarbij staan niet altijd economische gezichtspunten voorop het uitschakelen van menselijke tekortkomingen, het bevrijden van de mens van steeds terugkerende routine-achtige bezigheden in zijn werk, de betere constantheid van de resultaten zijn andere belangrijke argumenten die vaak pleiten voor de toepassing van automatische inrichtingen. Dit zijn ook de redenen die geleid hebben tot de ontwikkeling van een automatische belichtingsmethode voor de röntgendiagnostiek. Men verwacht van een belichtingsautomaat: a) een verbetering van de gemiddelde kwaliteit van de röntgenopnamen en b) een vereenvoudiging van de bediening van de röntgeninstallatie.

De grondgedachten voor een belichtingsautomaat zijn niet nieuw. Ze zijn reeds in 1929 bij C. H. F. Müller door H. Franke geformuleerd en in octrooien neergelegd ^[1], maar het duurde nog wel 20 jaar vóór de techniek de onderdelen ter beschikking kon stellen die noodzakelijk waren voor het ontwikkelen en construeren van betrouwbare belichtingsautomaten. Sinds ongeveer 10 jaar zijn nu toestellen van verschillend fabrikaat in de handel gebracht ^[2], en in de laatste jaren heeft de belichtingsautomaat door verschillende verfijningen (speciaal door het bereikbaar maken van zeer korte schakeltijden) op vrij grote schaal toepassing in de praktijk gevonden. In hetgeen volgt zullen wij de bij C. H. F. Müller ontwikkelde „Amplimat” beschrijven ^[3].

Voor een goed begrip beschouwen we eerst de voorwaarden waaraan moet worden voldaan voor het verkrijgen van een goede röntgenopname. De film moet, evenals bij de lichtfotografie, een bepaalde hoeveelheid straling (intensiteit $\times$ tijd) ontvangen. De keuze hiervan luistert echter bij de röntgenfotografie veel nauwer dan bij de lichtfotografie, ten eerste doordat men hier

geen kopieerproces heeft waarbij fouten in de oorspronkelijke belichting kunnen worden gecompenseerd, en ten tweede doordat de voor de röntgenfotografie toegepaste film (met emulsie aan twee kanten) in combinatie met de gebruikelijke versterkingsfoelies een veel hogere gradatie heeft dan de films voor de lichtfotografie. In fig. 1 zijn de zwarting van een röntgenfilm en die van een amateurfilm als functie van de logaritme van de belichting uitgezet. Terwijl voor de amateurfilm de gradatie γ kleiner dan 1 is, bedraagt zij voor de röntgenfilm $\gamma \approx 3$. De grotere steilheid is bij de röntgenopname noodzakelijk, aangezien de anatomische details die men in een röntgenbeeld wenst weer te geven vaak slechts zeer geringe intensiteitsverschillen in het stralenrelief teweegbrengen. Ten gevolge van deze grote steilheid bevindt men zich, als de belichting meer dan 40% van de gemiddelde waarde afwijkt, reeds niet meer in het bruikbare gebied van de zwartingskromme (tussen de gestippelde lijnen in fig. 1).

Het instellen van de belichting vindt in de röntgenfotografie plaats bij de stralingsbron. Voor dit doel staan drie grootheden ter beschikking, die voor iedere opname moeten worden gekozen: a) de spanning op de röntgenbuis, b) de stroom door de röntgenbuis, c) de

^[1] DRP 574 441 van 10.3.1929. Zie verder: H. Franke, Ionimetrische Bestimmung optimaler Belichtungszeiten, Kongreßheft Fortsch. Röntgenstr. **40**, 99-100, 1929; Der Belichtungsautomat, 1. Kongreßheft Fortsch. Röntgenstr. **42**, 153-154, 1930.

^[2] K. Bischoff, Der Iontomat, ein neuer Belichtungsautomat für Röntgenaufnahmen, Fortsch. Röntgenstr. **71**, 994-1002, 1949.

M. Fourlon, Les appareils photo-électriques pour la détermination des temps de pose, J. Radiol. Electrol. **33**, 39-42, 1952.

P. C. Hodges, Photoelectric timing in general radiography, Acta radiol. Suppl. Nr. 116, 605-612, 1954.

Th. Lohmann, Ein neuer Belichtungsautomat für die Lungen-Diagnostik, Röntgenblätter **7**, 259-267, 1954.

F. E. Stieve, Untersuchungen über das Wirkungsprinzip von Belichtungsautomaten für Röntgenaufnahmen, Fortsch. Röntgenstr. **85**, 491-510, 1956.

^[3] E. Zieler, Der Amplimat, ein Belichtungsautomat für allgemeine Röntgenographie, Fortsch. Röntgenstr. **86**, 382-393, 1957.

^[4] F. E. Stieve, Belichtungsautomaten in der Praxis, Röntgenblätter **9**, 325-333 en 363-372, 1956.

H. Elgström en dr. E. Zieler zijn medewerkers van C. H. F. Müller GmbH, Hamburg.

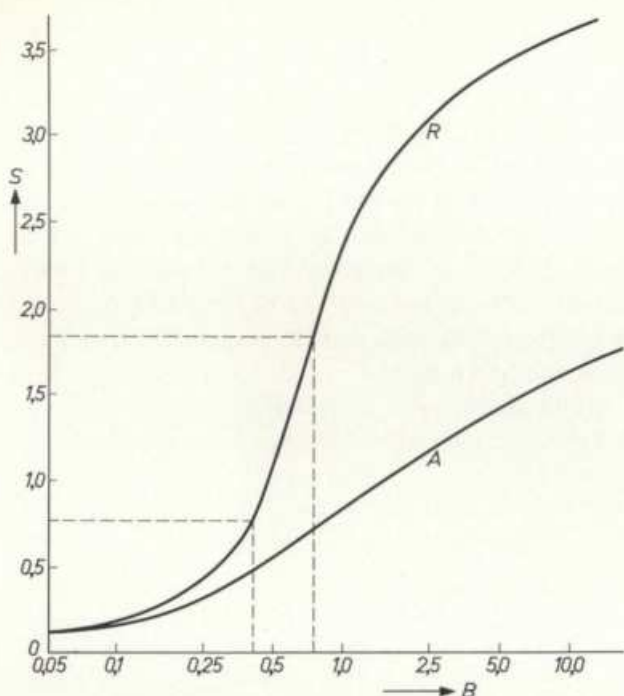


Fig. 1. Filmzwarting S als functie van de belichting B (intensiteit $\times$ tijd). Bij een röntgenfilm (R) is de tolerantie in de belichting aanzienlijk kleiner dan bij een normale amateurfilm (A).

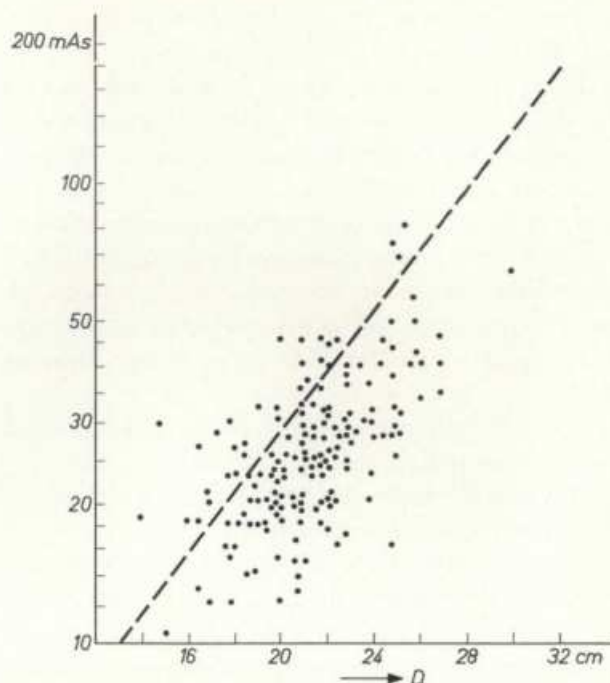


Fig. 2. Spreiding van het mAs-product dat voor gelijke zwarting van de film vereist was bij een reeks longopnamen aan patiënten van verschillende dikte D . Ontleend aan Stieve ⁽⁴⁾.

belichtingstijd. De spanning bepaalt het contrast van het röntgenbeeld en wordt dan ook in eerste instantie, naar gelang van het weer te geven medische object, volgens dit gezichtspunt gekozen. Blijven dus over de buisstroom en de belichtingstijd, waarmee de stralingshoeveelheid evenredig is en waardoor men aan de filmzwarting de gewenste waarde kan geven. Voor ieder type opname en de daarbij behorende buisspanning moet men uit de ervaring en uit een schatting van de dikte van de patiënt afleiden welke waarde het product van stroom $\times$ tijd (het mAs-product) zal moeten hebben. Door de uiteenlopende dichtheid kan men dan fouten in de belichting krijgen. Hoe groot

deze wel kunnen zijn, wordt geïllustreerd door fig. 2. Hierin is als functie van de dikte van de patiënt het mAs-product uitgezet dat bij een groot aantal patiënten vereist was om een longopname met telkens dezelfde gemiddelde filmzwarting te maken. De streeplijn geeft de waarden uit een belichtingstabel, die gebaseerd is op de ervaring voor gemiddelde gevallen. Uit de punten blijkt dat bij een dikte van 20 cm de juiste waarde voor de opname kan liggen tussen 12 en 45 mAs, of voor een dikte van 25 cm

tussen 16 en 70 mAs. Maakt men de opname volgens de belichtingstabel, dan krijgt dus een aanzienlijk gedeelte van de opnamen een geheel verkeerde belichting. Duidelijk blijkt hier het voordeel van een belichtingsautomaat, die de onzekerheid van een schatting vervangt door een objectieve meting.

De algemene opzet van de Amplimat

De algemene opzet van onze belichtingsautomaat is in fig. 3 geschetst. Hij bevat een ionisatiekamer, die als opnemer fungeert, een elektronisch gedeelte, bestaande uit versterkers en het voedingsapparaat, en de links in

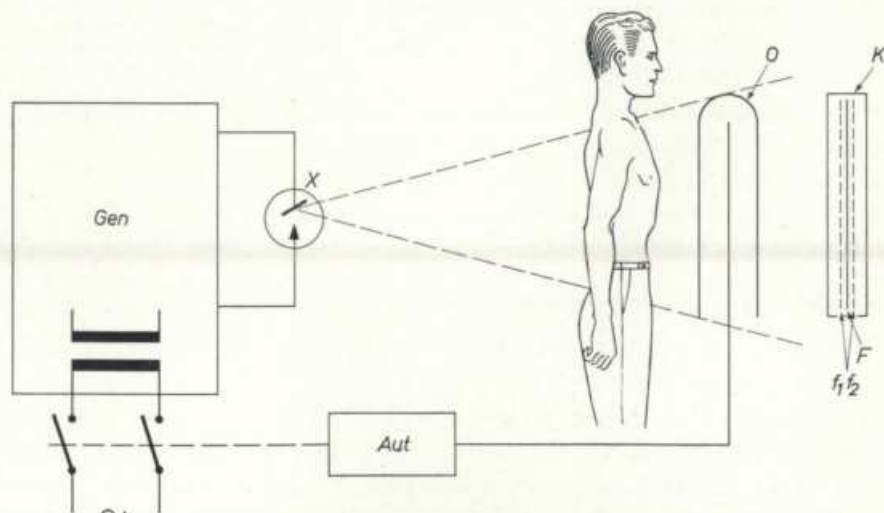


Fig. 3. Opstelling voor röntgenopnamen met behulp van de belichtingsautomaat „Amplimat“. Gen röntgen generator. X röntgenbuis. O opnemer. Aut elektronisch gedeelte van de belichtingsautomaat. K cassette met film F en fluorescerende versterkingsfoelies $f_1 f_2$.

de figuur getekende netschakelaar voor de hoogspanningstransformator van de röntgengenerator. De onderdelen voor de bediening van de Amplimat, waarop hieronder nog zal worden ingegaan, worden tegenwoordig in de bedieningslessenaar van de röntgengenerator ondergebracht.

Bij de Amplimat bevindt zich de opnemer tussen de patiënt en de filmcassette. In principe zou hij ook *achter* de cassette kunnen worden geplaatst; deze opstelling wordt in sommige fabrikaten toegepast. Voor onze keuze gaven in hoofdzaak de volgende overwegingen de doorslag:

- 1) Door de cassette met film en versterkingsfoelies wordt de röntgenstraling aanzienlijk verzwakt, zodat men bij plaatsing achter de cassette een veel gevoeliger versterker nodig heeft.
- 2) De verzwakking van de straling door de versterkingsfoelies hangt sterk af van de kwaliteit van de straling, zodat men bij plaatsing achter de cassette de gevoeligheid moet corrigeren naar gelang van de gekozen buisspanning, hetgeen nogal lastig te realiseren is.
- 3) Bij onze opstelling is men onafhankelijk van de nadere uitvoering van de cassettes (het materiaal van het cassettedeksel, eventuele aanwezigheid van lood in het deksel en van spanbeugels die nog op allerlei wijzen aangebracht kunnen zijn).

De vóór de cassette in de straling geplaatste opnemer (die men natuurlijk zo moet uitvoeren dat hij geen schaduw in het beeld veroorzaakt, zie hieronder) meet de dosis röntgenstraling die tijdens de opname uit de patiënt treedt [5]. Deze dosis bepaalt de zwarting van de film. Met de zg. zwartingskiezer kan men het toestel instellen op de dosis die de film nodig zal hebben voor de juiste zwarting: zodra dan tijdens de opname de dosis deze vooraf ingestelde waarde bereikt, schakelt de belichtingsautomaat de hoogspanningsgenerator van het net af. Aldus regelt de belichtingsautomaat de belichtingstijd; deze grootheid behoeft dus niet meer aan het röntgenapparaat te worden ingesteld, wel echter nog de buisspanning en de buisstroom. De consequenties die de invoering van de belichtingsautomaat voor de instelling van deze grootheden heeft, bespreken we in de volgende paragraaf.

De wijze waarop de röntgenbuis wordt belast

Bij de levende objecten, waarmee men in de medische röntgendiagnostiek te maken heeft, wil men zo kort mogelijk belichten, om de bewegingsonscherpte op de film zo klein mogelijk te houden. De organen in de borstholte maken ten gevolge van de hartslag bewegingen waarbij volgens de onderzoeken van Berger snelheden tot 400 mm/s kunnen optreden [6]. Een zo kort mogelijke belichting betekent dat men de röntgen-

buis zo hoog mogelijk moet belasten. De belastbaarheid wordt in principe beperkt door de focustemperatuur. Deze neemt tijdens het belichten toe, en wel sneller naarmate de belasting groter is gekozen. Hieruit resulteert een verband tussen toelaatbaar buisvermogen en belichtingstijd, de zg. belastingskarakteristiek, die in fig. 4 is weergegeven: de grafiek geeft voor iedere belichtingstijd aan hoe groot men het vermogen mag kiezen opdat aan het eind van de belichting de focustemperatuur nog juist niet de maximaal toelaatbare waarde te boven gaat.

Werkt men nu met de belichtingsautomaat, dan is de belichtingstijd niet van tevoren bekend en men kan

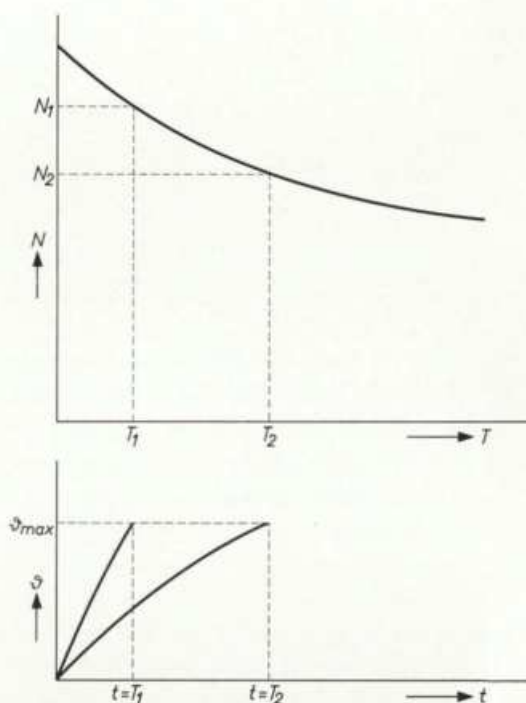


Fig. 4. Belastingskarakteristiek van een röntgenbuis voor diagnostiek: de toelaatbare (constante) belasting N is uitgezet als functie van de belichtingstijd T . In de onderste grafiek is voor twee belastingen (N_1 en N_2) het verloop van de temperatuur θ in het focus met de tijd t weergegeven. Na afloop van de bijbehorende belichtingstijd (T_1 , T_2) is juist de maximaal toelaatbare temperatuur $\theta_{\max}$ bereikt.

niet het optimale vermogen voor de röntgenbuis instellen. Kiest men een zeer grote stroom, zoals vereist zou zijn voor een korte belichtingstijd, dan kan het gebeuren dat in de tijd die volgens de karakteristiek van fig. 4 toelaatbaar is, de voor een juiste filmzwarting vereiste dosis nog niet wordt bereikt; de opname wordt dan beëindigd doordat de beveiliging van de buis deze uitschakelt, en men krijgt een onderbelichte film. Kiest men een veel lagere waarde van de stroom, die gedurende langere tijd toelaatbaar is, dan krijgt men opnamen met de juiste zwarting, maar de belichtingstijd zal langer en daarmee de bewegingsonscherpte in het

röntgenbeeld groter zijn dan strikt noodzakelijk is.

Deze nadelen worden vermeden door een opneemmethode die reeds in 1933 door Bouwers in het Philipslaboratorium te Eindhoven is voorgesteld [7]. Het principe hiervan is dat men de belasting van de röntgenbuis gedurende de belichtingstijd laat dalen. De opname begint met het grootste beschikbare vermogen (d.w.z. de grootste bij de gekozen spanning instelbare stroom), waardoor het focus in zeer korte tijd zijn maximale temperatuur bereikt (fig. 5). Vervolgens wordt de stroom door een automatische inrichting geleidelijk verminderd, zodanig dat de focustemperatuur

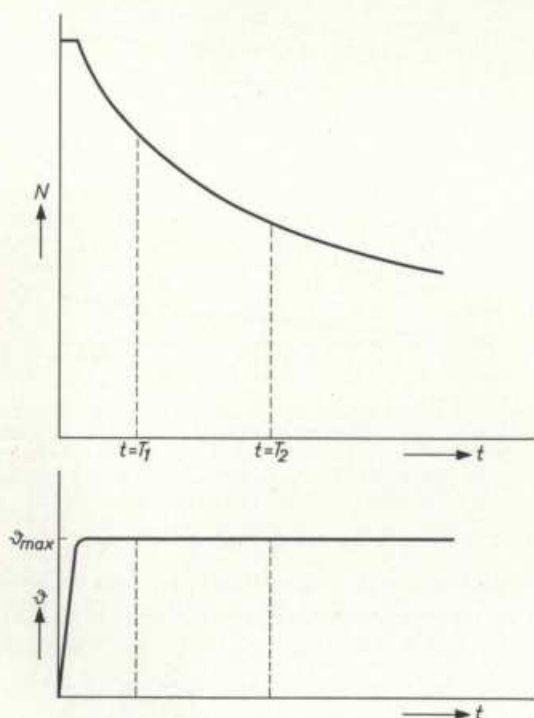


Fig. 5. Belichting met dalende belasting. De belasting N van de röntgenbuis begint bij alle opnamen met de grootste instelbare stroomwaarde en neemt dan steeds volgens eenzelfde functie van de tijd t af. De focustemperatuur bereikt ten gevolge van de zeer grote beginbelasting in zeer korte tijd de toelaatbare waarde θ_{max} en blijft verder ongeveer constant.

bij benadering constant blijft. Onafhankelijk van de tijdsduur waarna de belichtingsautomaat zal uitschakelen, wordt nu de buis altijd ten volle gebruikt en men krijgt in ieder geval de kortst mogelijke belichtingstijd. De instelling van de stroom komt te vervallen en de gebruiker behoeft alleen nog de buisspanning te kiezen (éénknopsbediening).

Reeds in de jaren '30 is in de röntgendiagnostiektoestellen van Philips en C. H. F. Müller een dergelijke belastingsmethode toegepast, eerst bij de SUPER D in een nog tamelijk onvolmaakte, dan bij de MAXIMUS D in een technisch meer bevredigende vorm. Doordat er meer apparatuur voor nodig is, kon deze be-

lastingsmethode echter voor de conventionele opnametechniek met vooraf ingesteld mAs-product geen vaste voet krijgen. De voordelen ervan komen pas door de combinatie met de automatische belichting volledig tot hun recht.

De fysische processen in de ionisatiekamer

De meting van de röntgenstraling kan men baseren op de ioniserende werking of op de opwekking van fluorescentielicht. In het laatste geval combineert men een fluorescentiescherm met een fotomultiplicatorbuis. Laat men de stroom van de fotomultiplicator een condensator laden, dan is de verzamelde lading een maat voor de röntgendosis. Deze methode is doelmatig in die gevallen waar zichtbaar licht wordt geproduceerd, en ze wordt dan ook b.v. in de schermbeeldfotografie veel toegepast.

Voor de algemene röntgendiagnostiek echter heeft de op de ionisatie gebaseerde meetmethode belangrijke voordelen. Men kan hiervoor betrekkelijk eenvoudige opnemers construeren die geschikt zijn voor plaatsing vóór de cassette (we hebben boven uiteengezet waarom we dit wenselijk achten). Verder kan hierbij op eenvoudige en goedkope wijze de opnemer worden aangepast aan de medische eisen. Ook is van belang dat bij de ionisatiekamer de lading van de ionen altijd in gelijke mate tot het meetresultaat bijdraagt, onafhankelijk van de plaats in het beeld waar ze is opgewekt. Bij opnemers voor fluorescentielicht kan aan deze voorwaarde in het algemeen slechts bij benadering worden voldaan, aangezien het fluorescentielicht door lichtgeleiders naar de fotokathode moet worden gevoerd; hierbij treden altijd verliezen op, die afhangen van de weg van het licht. Om deze redenen hebben wij bij de ontwikkeling van de Amplimat de ionisatiemethode verkozen.

De ionisatiekamer bestaat in zijn eenvoudigste vorm uit twee planparallele elektrodes, waaraan een gelijkspanning wordt gelegd, de kamerspanning, en waartussen zich een gas bevindt. Valt er röntgenstraling op de kamer, dan wordt in het elektrodemateriaal en in het vulgas een gedeelte van de röntgenquanta geabsorbeerd. Door ieder geabsorbeerd quantum wordt een elektron uit zijn atomaire binding vrijgemaakt, dat een grote energie meekrijgt en nu op zijn beurt in het vulgas een groot aantal ionenparen produceert. Is de kamer gevuld met lucht onder normale druk en temperatuur en bestaan de elektrodes uit een materiaal equivalent met lucht (b.v. grafiet), dan produceert één

[5] Korteheidshalve zullen we in dit artikel voor de hoeveelheid straling de aanduiding „dosis” gebruiken, hoewel het niet een dosis betreft die men in röntgens kan uitdrukken (zie ook blz. 82).

[6] A. Berger, Zum Problem der Bewegungsunschärfe im Röntgenbild der Lunge und des Herzens, Röntgenblätter 14 369-380, 1961.

[7] A. Bouwers, Verkürzung der Aufnahmezeit durch eine neue Belastungsmethode, Fortschr. Röntgenstr. 47, 703-706, 1933.

röntgen, per definitie [8], in 1 cm^3 $2,1 \times 10^9$ ionenparen. Door de kamerspanning ontstaat in de ionisatieruimte een elektrisch veld, waarin de ionen naar de elektrodes lopen. Men kiest de spanning zo hoog dat alle ionen de elektrodes bereiken (verzadigingsstroom, zie blz. 83). Uit het genoemde aantal ionenparen volgt dan dat in een kamer als boven beschreven en met een ionisatievolume van 1 cm^3 aan een doseringssnelheid van 1 R per seconde een verzadigingsstroom van $3,3 \times 10^{-10} \text{ A}$ beantwoordt.

Aangezien de vereiste doses bij röntgenopnamen met versterkingsfoelies ca. 0,5 tot 1 mR bedragen, krijgt men uiterst kleine ionenstromen, zodat men een zeer gevoelige gelijkstroomversterker moet gebruiken. Om de versterker zo eenvoudig mogelijk te houden, zal men dus ernaar streven de ionisatieprocessen zodanig te beïnvloeden dat de ionenstroom zo groot mogelijk wordt. Hiertoe heeft men bij de constructie van de kamer op allerlei wijzen gelegenheid.

Om te beginnen, het elektrodemateriaal: hiervoor gebruiken we een metaal, dus een materiaal met betrekkelijk hoog kernladingsgetal. De hieruit vrijgemaakte elektronen veroorzaken in het vulgas een aanzienlijk sterkere ionisatie dan elektronen uit wanden equivalent met lucht. Weliswaar hangt nu de versterkingsfactor voor de ionenstroom nog af van de energie van de in de kamerwanden geabsorbeerde röntgenquanta (en dus van de spanning op de röntgenbuis), zodat een dergelijke ionisatiekamer niet meer geschikt is voor de meting van de straling in röntgens. Maar dit is in ons geval geen nadeel doch eerder een voordeel. Aangezien voor de fluorescerende versterkingsfoelies in het algemeen CaWO_4 wordt genomen, dus een materiaal met atomen van hoog kernladingsgetal, lijkt de met kamerwanden van metaal geïntroduceerde energieafhankelijkheid van de ionenstroom enigszins op de energieafhankelijkheid van de hoeveelheid licht die in de versterkingsfoelies wordt opgewekt. Dit betekent dus dat bij gelijke dosis het door de opnemer geleverde signaal weliswaar nog afhangt van de röntgenbuisspanning, maar op ongeveer dezelfde wijze als het geval is met de hoeveelheid licht op de film.

Ter vergroting van de ionenstroom zijn ook gunstig een groot kamervolume, alsmede een hoge druk en een hoog kernladingsgetal van het vulgas. Eenvoudigheidshalve gebruiken we echter als vulgas alleen lucht van atmosferische druk. Wat betreft het volume: we zullen later zien (blz. 83) dat de oppervlakte van de kamer door de situatie bij de opname wordt bepaald, zodat een volumeverandering alleen door verandering van de elektrodenafstand mogelijk is. Fig. 6 laat de invloed hiervan op de ionenstroom zien. Bij elektrodes equivalent met lucht verloopt de ionenstroom volgens de rechte lijn *a*; de krommen *b* geven het verloop voor

drie koperfoelies van verschillende dikte. Het verloop van deze krommen is als volgt te begrijpen. In het linkergedeelte van de krommen is de elektrodenafstand kleiner dan de dracht van de foto- en Compton-elektronen die door de koperen elektrodes worden gemiteerd. De elektronen hebben dan nog niet hun gehele kinetische energie voor ionisatie verbruikt als zij op de tegenovergelegen wand van de kamer botsen. In het knikpunt van de krommen is het zo dat de elektronen deze wand juist bereiken. Voert men de elektrodenafstand nog meer op, dan kunnen de door de wand ge-

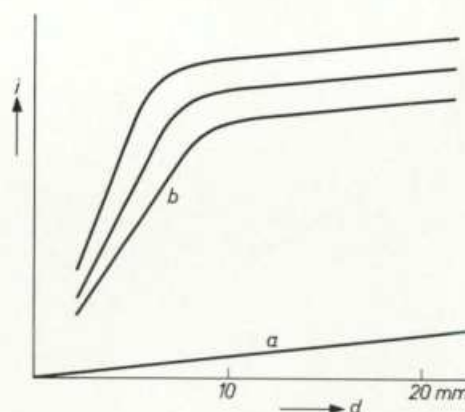


Fig. 6. Invloed van de elektrodenafstand *d* op de ionenstroom *i* van een ionisatiekamer (schematisch). De rechte lijn *a* geldt voor het geval van elektrodes equivalent met lucht, de drie krommen *b* gelden voor elektrodes van koper van verschillende dikte.

leverde elektronen de ionenstroom niet meer vergroten, zodat de verdere toeneming hiervan alleen te danken is aan elektronen vrijgemaakt in de lucht zelf. De elektrodenafstand waarbij de knik in de krommen *b* optreedt, hangt af van de energie van de in de wand vrijgemaakte elektronen, dus ook van de energie van de röntgenquanta die deze elektronen vrijmaken.

Met deze invloed van de elektrodenafstand heeft men een mogelijkheid in de hand de variatie van de kamergevoeligheid met de buisspanning nog nauwkeuriger aan te passen bij de spanningsafhankelijkheid van de versterkingsfoelies. Een andere mogelijkheid daartoe levert de nadere keuze van soort en dikte van het elektrodemateriaal. Fig. 7 laat aan enkele voorbeelden zien hoe hierdoor het verband tussen de ionenstroom en de spanning op de röntgenbuis wordt beïnvloed, bij constante doseringssnelheid. Bij kleine spanningen overheerst de absorptie van de elektronen in het metaal, daar de energie van de elektronen gering is. Voert men de spanning op, dan kunnen steeds meer elektronen uit steeds diepere lagen uittreden naar de gasruimte, maar de absorptie van de röntgenstraling door de metaallaag wordt steeds minder. Op deze wijze ontstaat het maximum in het middelste spanningsgebied, en het is be-

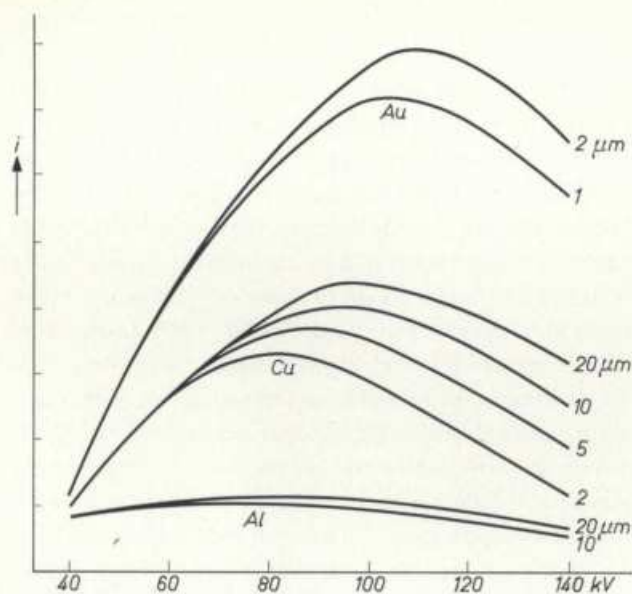


Fig. 7. De ionenstroom i als functie van de spanning op de röntgenbuis, bij gebruik van elektrodes van verschillende metalen en met verschillende dikte. (De zeer dunne metaallagen worden op een kunststofolie aangebracht.)

grijpelijk dat de hoogte en de ligging van het maximum moeten afhangen van het materiaal en zijn dikte.

Uit het bovenstaande blijkt op welke wijze de spanningsafhankelijkheid van de ionisatiekamer kan worden aangepast aan die van de versterkingsfoelie, zodanig dat de belichtingsautomaat met een bepaalde combinatie van film en foelies steeds uniform gezwarte opnamen levert. De in combinatie met een fijnkorrelige Cawo-foelie verkregen resultaten zijn in fig. 8 weergegeven [9]. Men ziet dat de constantheid van de filmzwarting voor de praktijk voldoende is.

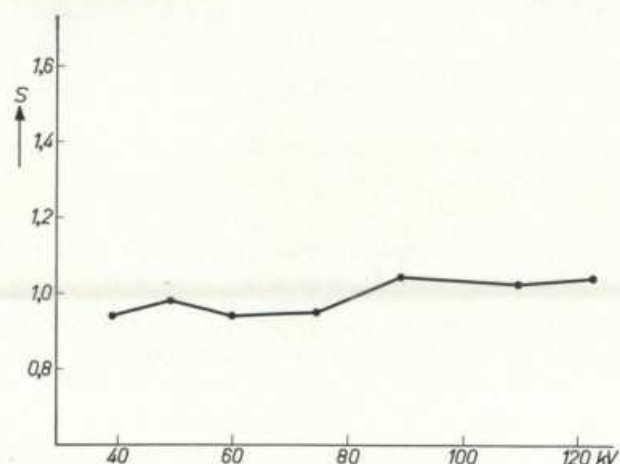


Fig. 8. Als functie van de spanning op de röntgenbuis is uitgezet de filmzwarting S die werd verkregen bij opnamen van een gegeven object met een fijnkorrelige Cawo-foelie, met gebruik van de Amplimat. Uit het feit dat S ongeveer constant is, blijkt dat de golflengteafhankelijkheid van de ionisatiekamer goed aangepast is bij die van de gebruikte versterkingsfoelie.

Bij langer verblijf in de gasruimte neutraliseren tegengesteld geladen ionen elkaar. De waarschijnlijkheid dat een ion een elektrode bereikt, zal groter zijn naarmate het sneller door de gasruimte loopt, d.w.z. naarmate de veldsterkte in de ionisatiekamer groter is. Hieruit volgt dat de ionenstroom zal afhangen van de kamerspanning. Bij voldoende hoge spanning bereiken alle ionen de elektrodes en de stroom heeft zijn verzadigingswaarde. Bij de belichtingsautomaat komt het echter niet alleen erop aan dat vrijwel alle gevormde ionen de elektrodes bereiken, maar het is ook van belang dat hun looptijd klein is ten opzichte van de tijd die ter beschikking staat voor het meetproces. Hieronder zullen wij zien dat bij de kortste opname die de Amplimat moet kunnen schakelen, het uitschakelsignaal reeds ongeveer 2 ms na het begin van de belichting moet worden gegeven. De maximale looptijd van de ionen moet dus nog aanzienlijk korter zijn, wil men bij deze opnametijden nog geen merkbare meetfout krijgen. Om aan deze eis te voldoen, is een veel hogere kamerspanning nodig dan voor de verzadiging, zodat we de invloed van de kamerspanning op de ionenstroom verder buiten beschouwing kunnen laten.

De constructie van de ionisatiekamer

Uit de plaatsing van de ionisatiekamer (zie fig. 3) vloeien voor de constructie hiervan de volgende eisen voort:

- Het geabsorbeerde gedeelte van de röntgenstraling dient zo klein mogelijk te zijn, aangezien dit voor de film verloren is en de dosis op de patiënt met eenzelfde bedrag moet worden verhoogd.
- De kamer mag geen onderdelen bevatten die storende schaduwen in het röntgenbeeld kunnen veroorzaken. De kamer moet dus ook een groter formaat hebben dan de grootste toegepaste film, aangezien anders de rand van de ionisatiekamer op de film zou worden afgebeeld.
- De dikte dient zo klein mogelijk te zijn, aangezien men bij vergroting van de afstand tussen patiënt en film een toeneming krijgt van de onscherpte in het beeld die door de eindige afmeting van het focus wordt veroorzaakt.

Door deze eisen komt men tot een platte kamer van groot formaat. Bij het streven naar een geringe dikte (eis c) is men beperkt door de hierboven beschreven invloed die de dikte (via de dracht van de elektronen) heeft op de spanningsafhankelijkheid. We hebben een dikte van 16 mm gekozen; zie de foto van de ionisatiekamer in fig. 9. Deze waarde is een bruikbaar compromis, daar bij een buisspanning van ca. 150 kV, d.i. de maximale spanning van de huidige diagnostiekgene-

[8] Zie b.v. J. Hesselink en K. Reinsma, Dosimeters voor röntgenstraling, Philips techn. T. 23, 47-59, 1961. Hierin worden allerlei belangrijke begrippen uit de dosimetrie toegelicht.

[9] E. Zieler, Untersuchungen zur Belichtungsautomatik unter besonderer Berücksichtigung des Amplimat, Fortschr. Röntgenstr. 88, 718-731, 1958.
O. Schott, Erfahrungen mit dem Belichtungsautomaten, Röntgen- und Laboratoriumspraxis 10, 131-139, 1957.

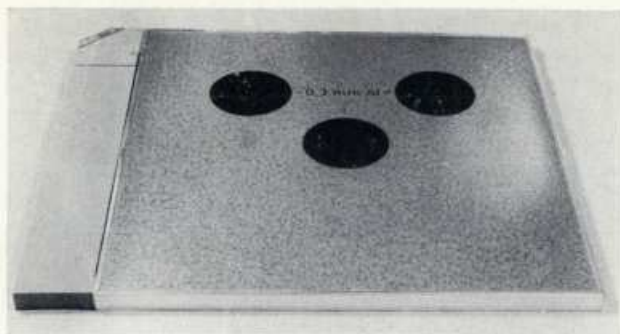


Fig. 9. Ionisatiekamer van de Amplimat, met drie meetvelden.

ratoren, elektronen uit de elektrodes worden vrijgemaakt die in lucht een dracht van 14 à 15 mm hebben.

Het spreekt niet vanzelf dat de gehele kamerdikte voor de elektronenweg ter beschikking staat. De signaal- of meetelektrode, waarop de lading wordt verzameld die men aan de ingang van de versterker toevoert, mag nl. niet tegen de wand van de kamer liggen; door de altijd vereiste afscherming zou hij daar een zo grote capaciteit ten opzichte van aarde krijgen dat de ionenlading niet meer voldoende zou zijn om nog goed meetbare spanningsverschillen te veroorzaken. De meetelektrode is derhalve in het *middenvlak* van de kamer uitgespannen, en de kamerspanning komt te staan tussen deze en twee symmetrisch tegen de wanden gelegen, met elkaar verbonden, tegenelektrodes, waarvan de capaciteit tegen aarde geen invloed op het meetproces heeft. Om bij deze configuratie toch een weg voor de elektronen ter beschikking te hebben die de gehele kamerdikte beslaat, is de meetelektrode voorzien van vele gaten, die de foto- en Compton-elektronen doorlaten, zodat deze niet alleen in de kamerhelft waar ze vrijgemaakt zijn maar ook in de andere kamerhelft ioniserend kunnen werken. Dat de elektronen nu op een deel van hun weg moeten lopen tegen de richting van het veld in dat voor het wegtrekken van de ionen zorgt, doet er niets toe, gezien hun grote energie.

Uit de bovenvermelde eis (b) volgt dat de röntgenstraling niet over de gehele oppervlakte van de ionisatiekamer mag worden gemeten. Immers, bij kleine objecten zoals de hals en de schedel zou dan aan de patiënt voorbijgaande, onverzwakte, straling op de kamer vallen en de belichtingsautomaat zou de hoogspanning uitschakelen voordat de film ter plaatse van het bedoelde object de vereiste dosis had gekregen. We meten dus de straling slechts op een bepaald gedeelte van de kameroppervlakte. Dit zg. meetveld mag anderzijds ook niet te klein zijn, aangezien de meetgrootte aan een bepaalde gemiddelde zwarting van de belangrijke gedeelten van de film dient te beantwoorden, maar niet beïnvloed moet worden door de toevallige verdeling

van kleine details. Naar onze mening is een meetveld ter grootte van ca. 50 cm² een gunstig compromis.

Van speciaal belang voor de praktijk is de ligging van het meetveld. We hebben bij de Amplimat als eerste het drieveldenprincipe toegepast (zie fig. 9), dat daarna spoedig door andere fabrikanten is overgenomen. Het is duidelijk dat voor de meeste toepassingen slechts een centraal gelegen meetveld in aanmerking komt, omdat men het beeld van het op te nemen object ook midden op de film brengt. Er zijn echter ook tweedelige objecten, die symmetrisch in het lichaam liggen, zoals de nieren en de longen. Voor normale longopnamen is het centrale meetveld onbruikbaar, daar het de dosis ter plaats van de hartschaduw zou meten, waar de filmzwarting ons in het geheel niet interesseert. Voor dit geval zijn juist de twee symmetrisch gelegen meetvelden geschikt, als deze ieder midden voor één long komen te liggen, zoals in fig. 10 is te zien. De meetvelden kunnen af-

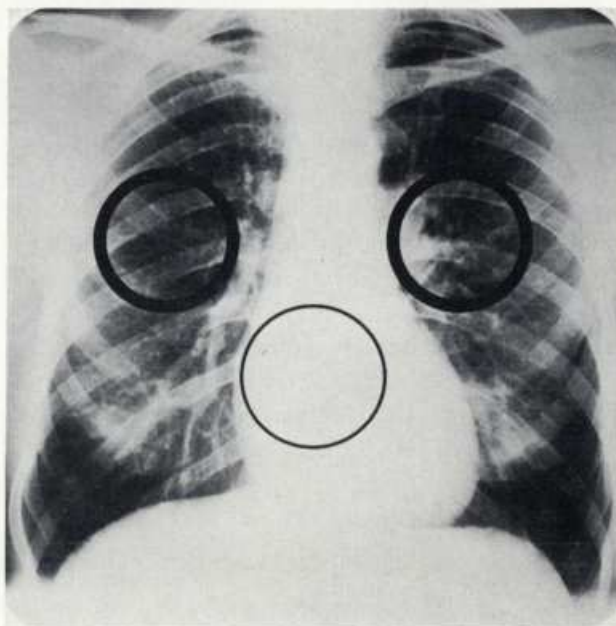


Fig. 10. Ligging van de meetvelden bij een longopname. Het middelste meetveld wordt hierbij uitgeschakeld.

zonderlijk of in willekeurige combinatie worden ingeschakeld. Deze mogelijkheid is b.v. bijzonder nuttig voor een longopname bij een patiënt waarvan de long aan één kant sterke pathologische absorpties vertoont, of bij longopnamen van opzij.

In fig. 11 is de ten dele opengesneden ionisatiekamer van binnen te zien, fig. 12 geeft een doorsnede ter plaatse van een meetveld weer (ter wille van de duidelijkheid niet op schaal getekend). In het middenvlak van de kamer bevindt zich een elektrisch zeer goed isolerende kunststofhoelie, die ter plaatse van de meetvelden aan beide kanten met een elektrisch geleidende lak bedekt is,

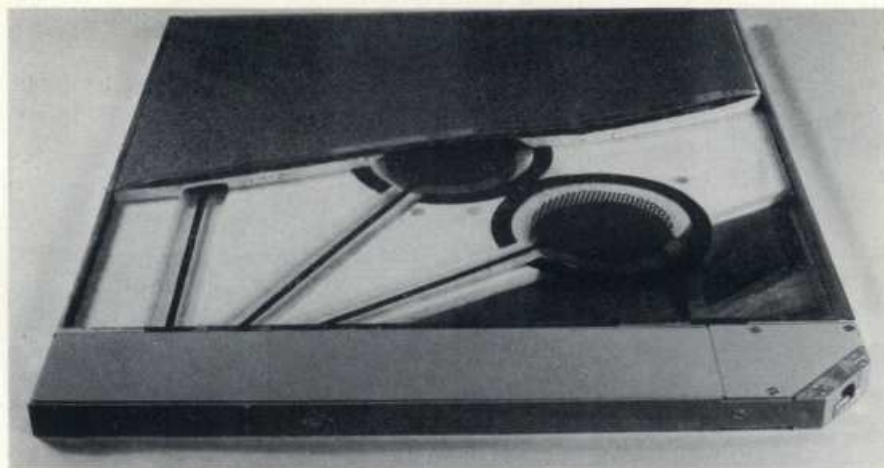


Fig. 11. Ten dele opgesneden ionisatiekamer. Men ziet de elektrodesystemen voor twee van de meetvelden.

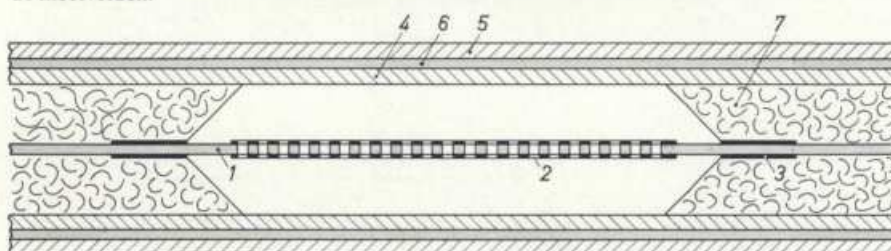


Fig. 12. Dwarsdoorsnede van de ionisatiekamer ter plaatse van een meetveld (niet op schaal getekend). 1 kunststoffoelie waarop met geleidende lak de middenelektrode 2 en een afschermring 3 zijn aangebracht. De middenelektrode en de hierdoor bedekte foelie zijn geperforeerd om het passeren van de ioniserende elektronen mogelijk te maken. De twee koperfoelies 4 vormen de tegenelektrode. 5 huis van de kamer (aluminiumblik van 0,3 mm dikte). 6 isolerende foelies. 7 schuimstofvulling.

die de signaalelektrode vormt en die in het röntgenbeeld geheel onzichtbaar is. In fig. 13 is deze kunststoffoelie met de uit drie delen bestaande signaalelektrode afzonderlijk afgebeeld. Men ziet duidelijk de hierboven vermelde perforaties. De elektrische toevoerleidingen bestaan eveneens uit strepen van geleidende lak, want ook zeer dunne koperdraden zouden in het röntgenbeeld zichtbaar worden. Als tegenelektrodes dienen zeer dunne koperfoelies van hetzelfde formaat als de gehele ionisatiekamer, zodat in het röntgenbeeld ook hiervan geen afbeelding ontstaat. De gehele ruimte binnen de ionisatiekamer is, behalve ter plaatse van de meetvelden, met een schuimstof van zeer geringe dichtheid gevuld. De vrijgebleven luchtruimte vormt het effectieve ionisatievolume. Alleen hierin bewegen de gevormde ionen zich onder de invloed van een elektrisch veld naar de meetelektrode.

De dichtheid van de schuimstof moet zo gering zijn dat de hierin opgewekte strooistraling niet noemenswaard tot de ionisatie in het meetvolume kan bijdragen en ook geen storende sluiering op de film kan veroorzaken. Om te vermijden dat de begrenzing van de vrijgebleven luchtruimte in het röntgenbeeld zichtbaar wordt, is de schuimstof hier schuin afgesneden (fig. 12); zelfs bij vrij grote dichtheid is dit middel afdoende.

De koperelektrodes, waarop de kamerspanning komt te staan, zijn door kunststoffoelies geïsoleerd van het huis, dat bestaat uit zeer dun aluminiumblik. Door deze constructie is een behoorlijke mechanische stabiliteit van de ionisatiekamer verzekerd terwijl de voor de afbeelding beschikbare röntgenstraling niet overmatig wordt verzwakt. Met het oog op de zeer kleine ionenstroom moet de isolatie zeer goed zijn, wat met moderne kunststoffen te realiseren is. De isolatieweerstand van de schuimstof is hier echter niet voldoende; daarom zijn hierin ter plaatse van de toevoerstroken naar de meetvelden kanalen aangebracht. De meetveldelektrodes zijn omgeven door afschermringen die eveneens met geleidende lak op de foelie zijn aangebracht (zie fig. 12 en 13). De potentiaal van deze ringen wordt gelijk gemaakt aan de

gemiddelde potentiaal van de meetelektrodes. Hierdoor worden parasitaire stromen zoveel mogelijk vermeden.

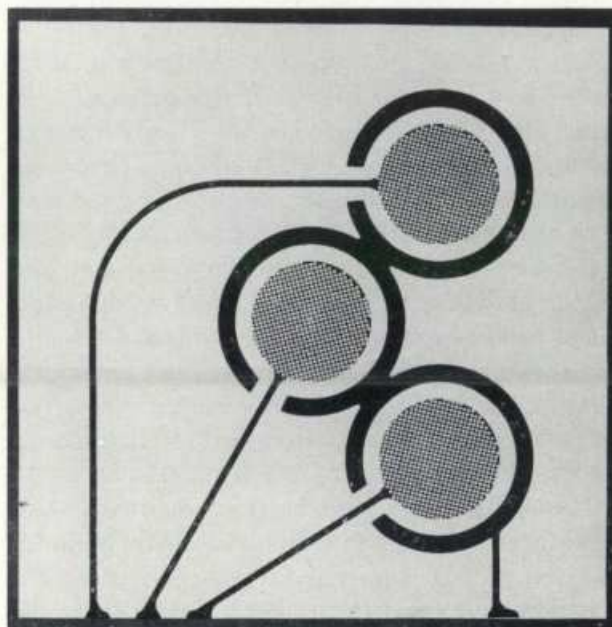


Fig. 13. Kunststoffoelie die in het middenvlak van de ionisatiekamer is uitgespannen, met de uit drie delen bestaande signaalelektrode voor de drie meetvelden en de afschermringen.

De voorversterker

De door de ionisatiekamer geleverde ionenstroom i ligt tussen 10^{-8} en 10^{-11} A. Laadt men met deze stroom een condensator C , dan is de spanning V op de condensator onze meetgrootte, die evenredig is met de dosis. Er geldt immers:

$$V = \frac{1}{C} \int_0^T i \, dt, \dots \dots \dots (1)$$

indien T de totale laadtijd is. De langste belichtingstijd waarvoor röntgengeneratoren in het algemeen worden gedimensioneerd, is 5 s. Hierbij krijgen we de kleinste ionenstroom, nl. 10^{-11} A. (De verandering die de ionenstroom tijdens de belichting ondervindt door het dalen van de belasting, kan bij deze beschouwingen worden verwaarloosd.) Neemt men b.v. een condensator van 100 pF, dan wordt de spanning op de condensator 0,5 V. Het beschikbare „stuurvermogen” is in dit geval van de orde van 10^{-12} W. Aangezien dit kleine vermogen voldoende moet zijn om een röntgengenerator van 50 kW betrouwbaar uit te schakelen, is het duidelijk dat men slechts met een zorgvuldig afgeschermd constructie klaarkomt. Het gunstigste is het als men de eerste trap van de versterker in het huis van de ionisatiekamer zelf onderbrengt. Deze weg hebben wij bij de Amplimat gekozen, daar het dan niet meer erg moeilijk is het signaal, zelfs over vrij lange leidingen, zonder storing naar de schakelapparatuur te voeren. De aldus met de ionisatiekamer zelf te combineren voorversterker moet het liefst in een volume ter dikte van de ionisatiekamer kunnen worden ondergebracht. Bij de nieuwste uitvoering is dit door toepassing van onderdelen in subminiatuurtechniek gelukt (fig. 17).

Het moeilijkste probleem was tot dusver de keuze van de eerste buis: de roosterstroom hiervan mag niet groter zijn dan 10^{-12} A, als men in het ongunstigste geval een fout van 10% wil toelaten. De in de handel verkrijgbare elektrometerbuizen die hieraan voldoen, zoals de 4065 Valvo, de DF 703 Telefunken, kan men hier niet gebruiken, want deze bezitten een direct verhitte katode en zijn daardoor mechanisch niet stabiel genoeg. In samenwerking met de buizenfabrikanten is het gelukt een speciale buis met voldoende stabiliteit te ontwikkelen. Wel heeft men nu nog een tweede buis nodig om het door de voorversterker geleverde signaal voldoende vrij van storing te kunnen houden.

Het te versterken signaal bevat zeer lage frequenties; de langste belichtingstijd is immers 5 s. Men heeft derhalve een gelijkstroomversterker nodig. Wij passen hier het systeem van de direct gekoppelde gelijkstroomversterker toe, omdat deze bij slechts twee trappen het eenvoudigste is. Zoals bekend, is bij zeer gevoelige gelijkstroomversterkers de drift van de ruststroom het

hardnekkigste storende effect. Daarom hebben wij, uitgaande van de bekende schakeling voor elektronisch gestabiliseerde voedingsapparaten, een schakeling ontwikkeld waarbij de ruststroom automatisch constant wordt gehouden.

Bij een gestabiliseerd voedingsapparaat (fig. 14) wordt een gedeelte van de uitgangsspanning V_{st} vergeleken met de normaalspanning V_n . Iedere afwijking brengt op de anodeweerstand R_a een versterkte spanningsverandering teweeg, die op het stuurrooster van de volgende buis B_2 komt te staan en het effect heeft

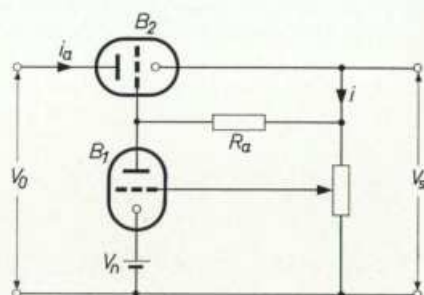


Fig. 14. Principe van een gestabiliseerd voedingsapparaat.

dat de oorspronkelijke variatie sterk wordt gereduceerd. Iedere fluctuatie van V_0 is dus in V_{st} slechts in veel geringere mate merkbaar. Is op V_{st} geen belasting aangesloten, dan betekent een constante spanning V_{st} tevens een constante stroom i resp. i_a .

In onze schakeling (fig. 15) passen we hetzelfde principe toe. V_2 is de anodespanningsbron voor de elektrometerbuis B_1 . De in de rusttoestand vloeiende stroom i wordt evenals in fig. 14 constant gehouden doordat hier de spanning iR_k vergeleken wordt met de vaste spanning V_n . Een constante i betekent tevens een constante anodestroom i_a in de volgende buis B_2 .

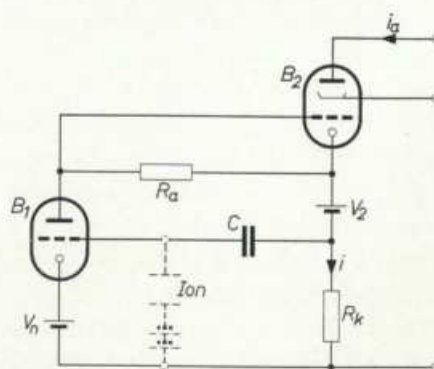


Fig. 15. Schakeling van de bij de ionisatiekamer ondergebrachte voorversterker. B_1 speciale elektrometerbuis met een roosterstroom $< 10^{-12}$ A en met indirect verhitte katode, waardoor de vereiste mechanische stabiliteit wordt verkregen. De ruststroom i wordt constant gehouden met behulp van de referentiespanningsbron V_n . De verandering van i_a die optreedt zodra de ionisatiekamer I_{on} een laadstroom aan de condensator C toevoert, is de meetgrootte; deze is evenredig met de bereikte dosis.

(er is een constante verhouding tussen de scherm-roosterstroom van B_2 en de anodestroom). De ionisatiekamer met zijn kamerspanning is in fig. 15 gestippeld aangegeven. De meetcondensator C , die door de ionenstroom wordt geladen, ligt in de roosterkring. Zijn (negatieve) spanning V_c wordt bij iR_k opgeteld, en de som wordt met V_n vergeleken. De schakeling zorgt ervoor dat deze som constant wordt gehouden:

$$V_c + iR_k = \text{constant.} \quad (2)$$

Indien V_c varieert, moet i eveneens variëren, zodanig dat steeds aan verg. (2) wordt voldaan. De verandering van i_a waarmee de verandering van i gepaard gaat, is onze meetgrootte: tijdens de belichting neemt i_a evenredig met de bereikte dosis toe.

Nauwkeuriger zouden we in plaats van verg. (2) moeten schrijven:

$$\Sigma V = 0, \text{ dus } V_n - V_g = V_c + iR_k. \quad (3)$$

De variatie van V_g blijft echter dank zij de versterking in de buizen zo klein dat verg. (2) bij voldoende benadering geldt. Voor de kleine variaties van V_g is de buiskarakteristiek met zeer goede benadering lineair, zodat ook voor de gehele versterker een lineair verband tussen de uitgangs- en de ingangsgrootte resulteert, zoals men in fig. 16 ziet. Het lineaire gebied strekt zich uit tot 13 mA, zodat een Δi_a van 12 mA benut kan worden. De ruststroom bedraagt 0,7 mA.

De constantheid over lange periodes hangt er natuurlijk in de eerste plaats van af hoe constant de vergelijkingsspanningsbron (een Zener-diode) is. We hebben de schakeling enige maanden onafgebroken laten werken en de fluctuaties van de ruststroomwaarde van i_a bleken nooit groter dan $\pm 25 \mu A$ te worden, hoewel alle voedingsspanningen zonder verdere stabilisering rechtstreeks van het net werden afgenomen.

In fig. 17 ziet men de voorversterker in geopende toestand. Behalve de beide buizen en de andere genoemde onderdelen bevat hij vier kleine relais, waarvan drie tot taak hebben de gekozen meetvelden in willekeurige combinatie op de ingang van de versterker aan te sluiten. Voor ieder meetveld is er een afzon-

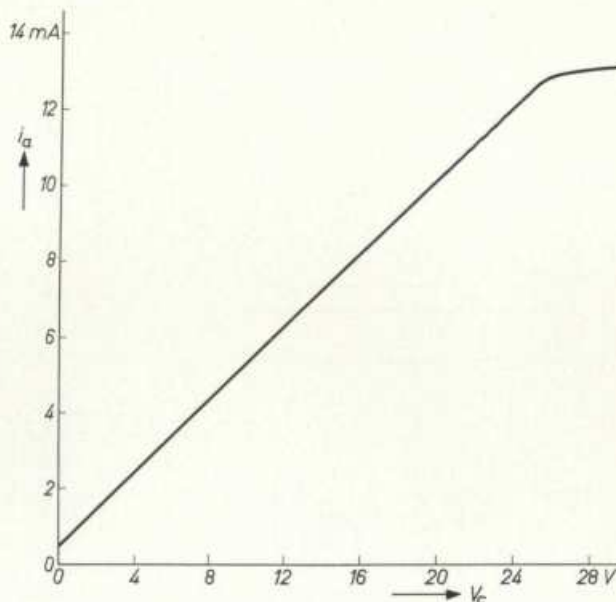


Fig. 16. Karakteristiek van de voorversterker: i_a als functie van de condensatorspanning V_c . In een gebied ter breedte van $\Delta i_a = 12 \text{ mA}$ is het verloop lineair.

derlijke condensator. Aangezien de ionenstroom bij een uniforme bestraling evenredig is met de oppervlakte van het meetveld, verandert de gevoeligheid van de kamer niet bij het combineren van de verschillende meetvelden; de verhouding tussen meetveldoppervlakte en capaciteit blijft immers constant.

De schakeling van de belichtingsautomaat

In fig. 18 is de gehele schakeling van de belichtingsautomaat weergegeven. Bovenaan is de leiding van het net naar de hoogspanningstransformator getekend, die via de contacten van twee sterkstroomrelais loopt. Het relais S_1 wordt door de belichtingsautomaat gestuurd en vóór begin van de opname ingeschakeld. Wordt het opnamecommando gegeven, dan sluit het relais S_2 zijn contacten, waardoor de opname begint. Parallel met het relais S_2 wordt via aanpassingselementen het relais S_8 bekrachtigd, dat zich in de voorversterker bevindt en dat in de rusttoestand de meetcondensator C_1 kortsluit. Door de bekrachtiging van S_8

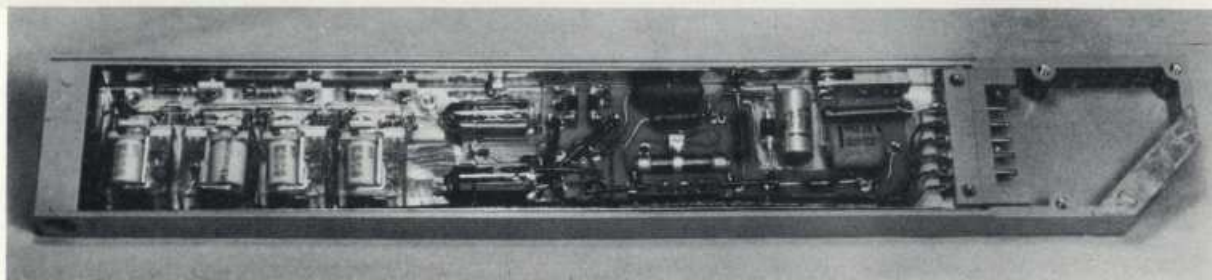


Fig. 17. De voorversterker in geopende toestand. Hij is ondergebracht in het gedeelte van het huis van de ionisatiekamer dat zich op de foto in fig. 11 onderaan bevindt.

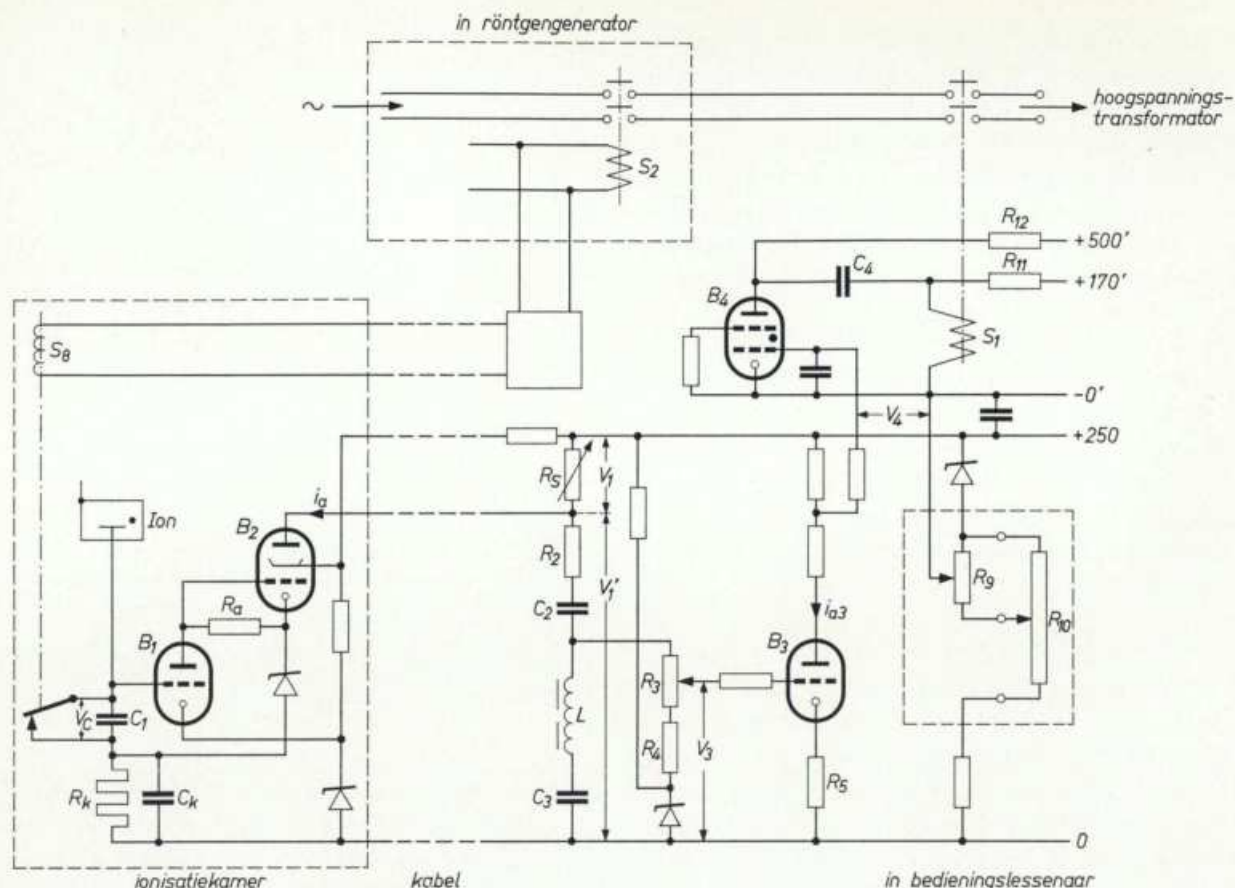


Fig. 18. De volledige schakeling van de Amplimat met de aansluitingen op de röntgengenerator. Links bevindt zich de ionisatiekamer met voorversterker, die door een kabel met de rest van de schakeling is verbonden. B_4 is het thyatron, dat op een gegeven moment door de toenemende signaalspanning wordt ontstoken, waardoor het relais S_1 afvalt en de opname wordt beëindigd. Voor de betekenis van de overige letters, zie fig. 15 en de tekst.

wordt zo lang als de opname duurt deze kortsluiting opgeheven. De opname wordt beëindigd doordat het relais S_1 zijn contacten opent.

In fig. 19 zijn de verschillende signaalgrootheden schematisch als functie van de tijd uitgezet. Gedurende de opname wordt de condensator C_1 geladen door de ionenstroom van de ionisatiekamer. Nemen we als eerste benadering een constante straling (fig. 19a), dan groeit de (negatieve) spanning V_c lineair met de tijd (fig. 19b). Zoals we hebben gezien, is de anodestroom i_a direct evenredig met de spanning V_c , zodat i_a eveneens lineair met de tijd groeit (in fig. 19c gestippeld aangegeven; de getrokken lijn wordt later verklaard). De voorversterker is door een kabel met het hoofdgedeelte van de schakeling verbonden. De anodestroom i_a vloeit door een der geleiders in deze kabel en door de instelbare anodeweerstand R_8 van de buis B_2 . Heeft i_a en daarmee de spanning V_1 over R_8 een vaste waarde bereikt (V_{1s}), dan krijgt de netschakelaar S_1 zijn uitschakelsignaal. Door instellen van de weerstand R_8 kan men de voor het bereiken van V_{1s} vereiste i_a -waarde en daarmee de dosis (d.w.z. de filmzwarting) kiezen waarbij de straling wordt uitge-

schakeld. De verandering van de spanning V_1 resp. van de complementaire spanning V_1' (fig. 18 en 19) komt via R_2 en C_2 als spanning V_3 op het rooster van de volgende versterkbuis B_3 te staan. Deze is door middel van R_5 sterk tegengekoppeld, en het werkpunt is aan het bovenste eind van de karakteristiek gelegd. Door een en ander volgt de anodestroom i_{a3} van deze buis in een groot gebied de roosterspanning V_3 (fig. 19f), en de spanning V_4 op het rooster van het thyatron B_4 volgt weer de stroom i_{a3} . Als V_4 een bepaalde waarde bereikt, ontsteekt het thyatron (fig. 19g) en het relais S_1 valt af.

Enige bijzonderheden van de schakeling

De schakeling bevat enkele bijzonderheden die wij nog in het kort willen bespreken.

R-C-koppeling

De condensator C_2 in fig. 18 dient voor de potentiaalscheiding maar ook voor de koppeling van twee gelijkstroomversterkertrappen. De R-C-keten die de signaaloverbrenging bepaalt, bestaat uit C_2 en de som van de hierop volgende weerstanden R_3 en R_4 . De R-C-keten is hier volgens andere gezichtspunten gedimensioneerd dan men in telecommunicatieschakelingen gewend is. Bij

een lineair met de tijd t toenemende ingangsspanning verandert de uitgangsspanning van de R - C -keten volgens $RC[1 - \exp(-t/RC)]$. Na een zekere tijd ($t \gg RC$) wordt deze spanning constant, wij hebben echter juist het beginstuk nodig ($t < RC$), want wij willen immers de (lineair onderstelde) stijging van de spanning zo getrouw mogelijk overbrengen. We moeten dus de tijdconstante

RC zo groot kiezen dat de uitgangsspanning ook bij de langste voorkomende belichtingstijd van 5 s nog niet essentieel van de lineaire stijging afwijkt. Met $RC = 20$ s wordt de afwijking in dat geval 11 %; het hierdoor veroorzaakte zwartingsverschil is op de röntgenfilm nog niet merkbaar.

Compensatie van de schakeltijd van het relais

Omdat de Amplimat met iedere gebruikelijke röntgengenerator moet kunnen werken, is hierin voor het uitschakelen van de voedingsspanning van de hoogspanningstransformator een eigen schakelrelais gebruikt. Bij een dergelijk relais heeft men een eindige vertragingstijd tussen het moment van het uitschakelen van zijn bekrachtigingsstroom en het moment van het opengaan van zijn contacten waardoor de sterkstroomketen wordt onderbroken. Wordt de voor een juiste filmzwarting vereiste dosis reeds bereikt met een belichtingstijd van dezelfde orde van grootte als de vertragingstijd van het relais, dan zou de film aanzienlijk worden overbelicht, doordat tussen het moment waarop het uitschakelsignaal wordt gegeven en datgene waarop de hoogspanning van de röntgenbuis werkelijk wordt uitgeschakeld, de film nog verder wordt belicht. Ten einde overbelichtingen bij deze korte opnametijden te vermijden, is in de schakeling van de Amplimat een kunstgreep toegepast: de invloed van de afvaltijd van het relais wordt hier gecompenseerd doordat men aan het signaal als het ware een voorsprong geeft. Hiertoe dient de condensator C_k die in de voorversterker parallel met R_k is geschakeld (fig. 18). Zolang er een constante anodestroom vloeit, is de condensator C_k geladen tot de spanning iR_k . De lading van de condensator volgt iedere verandering van de anodestroom slechts met een zekere vertraging, gegeven door de tijdconstante $R_k C_k$. Daardoor treedt de via de katodekring teweeggebrachte tegenkoppeling ook slechts met een vertraging in werking, en als de stroom begint te stijgen, heeft de buis op het eerste moment nog zijn volle versterking; de katodeweerstand is als het ware kortgesloten. Na de aanpassing van de condensatorlading echter heeft de steilheid nog slechts de kleinere, door de tegenkoppeling bepaalde, waarde. Op deze wijze ontstaat het verloop van de signaalgrootheden dat in fig. 19 reeds werd getekend. Het uitschakelcommando wordt nu een tijd ongeveer gelijk aan $R_k C_k$ eerder gegeven.

De schakeltijd van het relais bedraagt 3 ms en dienovereenkomstig is de tijdconstante $R_k C_k$ gekozen.

Vermindering van de afvaltijd van het relais

De beschreven compensatie van de afvaltijd van het relais kan natuurlijk niet meer helpen indien de juiste belichtingstijd slechts weinig groter is dan deze afvaltijd. Belichtingstijden korter dan de afvaltijd zijn in het

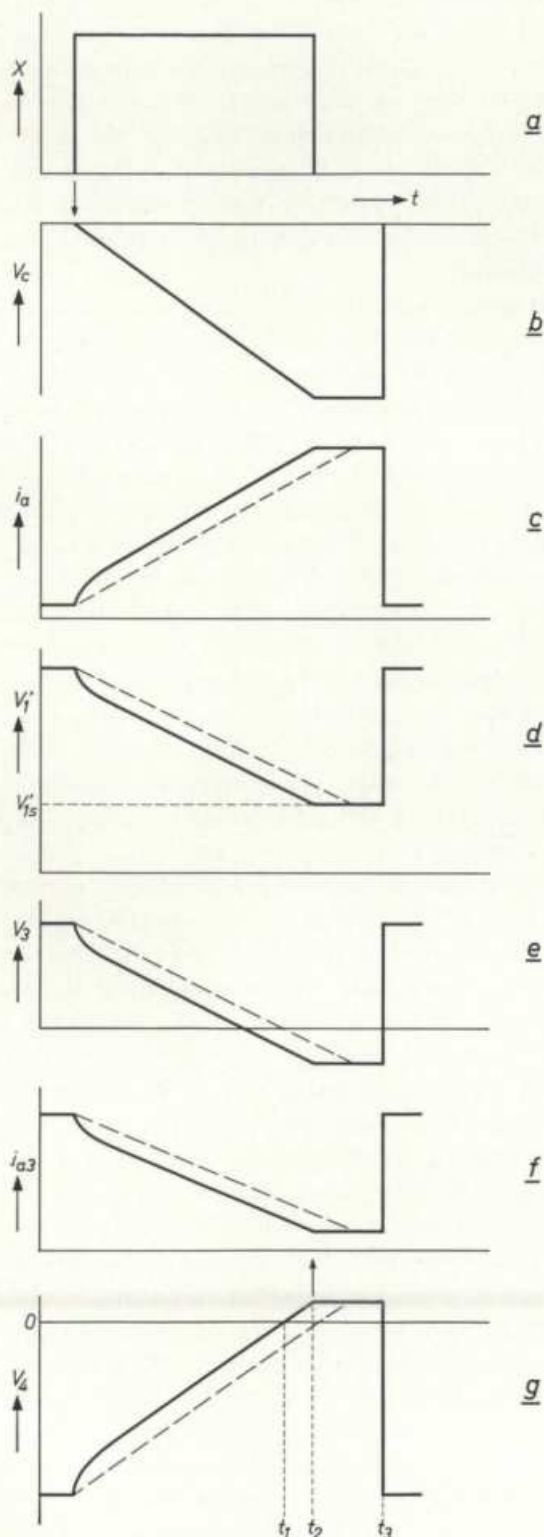


Fig. 19. De verschillende signaalgrootheden als functie van de tijd. De straling X is hier in eerste instantie constant ondersteld. Bij t_1 ontsteekt het thyatron, bij t_2 valt het relais S_1 af, bij t_3 het relais S_8 .

geheel niet mogelijk. Om aan de Amplimat een zo groot mogelijk toepassingsgebied te geven, moest dus de afvaltijd van het relais zo kort mogelijk worden gemaakt. Door een speciale constructie van het relais, met zo klein mogelijke massa's van de bewegende delen en met veel grotere veerkrachten dan gewoonlijk worden gebruikt, hebben we de tijd die het contactmechaniek voor zijn beweging nodig heeft buitengewoon kort kunnen maken.

Ook de elektrische keten van de spoel van het relais is van invloed op de schakeltijd. Wordt de houdstroom van de relaisspoel eenvoudig onderbroken, dan sterft hij uit volgens een exponentiële functie met de tijdconstante L/R (fig. 20, kromme I). L is daarbij de zelf-inductie van de spoel en R de som van de ohmse weerstanden in de keten. In het getekende voorbeeld, dat aan normale constructies beantwoordt, verdwijnt de

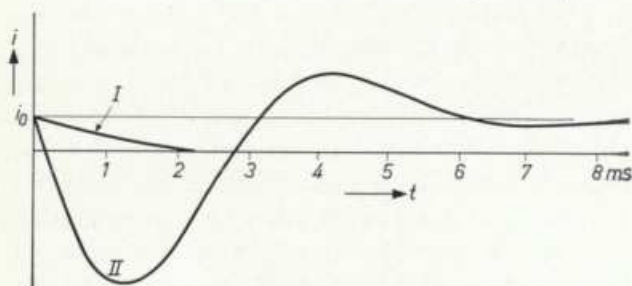


Fig. 20. Tijdsverloop van de stroom i in de spoel van het relais bij het uitschakelen, resp. bij de normale schakeling (I) en bij de in fig. 18 weergegeven schakeling (II). In het geval II wordt het magnetische veld van de spoel veel sneller gelijk aan nul dan bij I. i_0 is de houdstroom.

stroom eerst na 1,5 à 2 ms. Deze tijd kon aanzienlijk worden verkort door toepassing van de in fig. 18 reeds getekende schakeling. De houdstroom voor het relais (S_1) vloeit over de weerstand R_{11} ; de condensator C_4 is via de weerstand R_{12} op een hoge spanning geladen. In de rusttoestand is het thyatron B_4 niet geleidend, zijn ontsteking moet het afvallen van het relais teweegbrengen. Na het ontsteken wordt nu de condensator via het thyatron en de relaisspoel ontladen. Deze stroom vloeit in tegengestelde richting als de houdstroom en sterft als een gedempte trilling uit. De totale stroom heeft het verloop van kromme II in fig. 20. Hij wordt reeds na 0,1 ms gelijk aan nul, zodat de bekrachtiging van de elektromagneet veel sneller opgeheven is dan in het geval van kromme I. De hierop volgende tegengestelde magnetisatie doet er niet toe: de voor het opnieuw aantrekken van het relais vereiste stroom wordt toch niet bereikt.

Dank zij deze maatregelen opent het relais reeds 3 ms na het uitschakelcommando zijn contacten.

L-C-filter

In het bovenstaande hebben we er nog geen rekening mee gehouden dat de röntgenstraling niet constant is,

zoals in fig. 19a schematisch is getekend, maar dat ze een rimpel heeft, die veroorzaakt wordt door de hoogspanningsgelijkrichter. De frequentie van de grondgolf hangt af van de schakeling van deze gelijkrichter. Röntgengeneratoren van gemiddeld vermogen voedt men meestal uit het enkelfazige wisselspanningsnet; de rimpel heeft dan een grondfrequentie van 100 Hz („tweepulsgenerator”). Generatoren voor groter vermogen worden met draaistroom gevoed; bij de hiervoor gebruikte gelijkrichter bedraagt de grondfrequentie 300 Hz („zespulsgenerator”). De intensiteit van de straling, evenals de hiervan afgeleide signaal-grootheid i_a , zijn overeenkomstig deze spanningsrimpel gemoduleerd.

We hebben gezien dat ter compensatie van de afvaltijd van het relais de tegenkoppeling in de voorversterker frequentieafhankelijk is gemaakt (condensator C_k in fig. 18). Dientengevolge wordt de in het signaal aanwezige wisselspanning van 100 resp. 300 Hz méér versterkt dan het, lineair met de tijd toenemende, hoofdgedeelte van het signaal. De thyatronspanning heeft derhalve niet hetzelfde tijdsverloop als de dosis en de hiermee evenredige lading van de meetcondensator: de stijging van de thyatronspanning beantwoordt weliswaar gemiddeld aan de stijging van de stralingshoeveelheid die de filmzwarting bepaalt, maar op elk moment kan er een zekere afwijking zijn, naar gelang van het punt in de rimpelperiode waarop men zich bevindt. Vooral bij zeer korte belichtingstijden zouden hierdoor aanzienlijke verschillen in de filmzwarting kunnen ontstaan.

Om reproduceerbaar te kunnen schakelen, moet men dus de wisselspanning die door de frequentieafhankelijke tegenkoppeling selectief is versterkt, weer verzwakken, maar zonder afbreuk te doen aan de gewenste voorsprong die men wil geven aan het nuttige signaal, dat beantwoordt aan de gemiddelde spanningsstijging van de meetcondensator. Hiervoor is als filter een trillingskring $L-C_3$ aangebracht (zie fig. 18), die de amplitude van een 100 Hz-component, al naar gelang de instelling van R_s , tot $1/25$ à $1/50$ reduceert, en die van een 300 Hz-component tot $1/40$ à $1/80$.

Een sterkere filterwerking, die eventueel te verkrijgen zou zijn door een nog hogere kwaliteitsfactor van de $L-C$ -kring, is niet nodig en zelfs ongewenst, aangezien de overgangsverschuiven bij een kring langer duren naarmate zijn kwaliteit hoger is. Juist bij de korte belichtingstijden, waarbij de gesuperponeerde wisselspanning de grootste fouten kan veroorzaken, is ook het overgangsverschuiven van het filter van belang. Nemen we weer een met de tijd lineair verloopende ingangsspanning (zonder gesuperponeerde wisselspanning), dan stelt b.v. bij een gegeven stralingsintensiteit en instelling van R_s de rechte lijn a in fig. 21 de

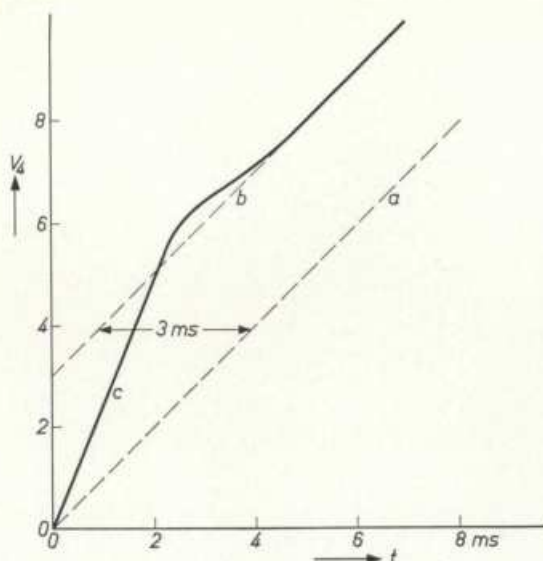


Fig. 21. Verloop van de roosterspanning V_4 van het thyatron. Bij gegeven (constante) stralingsintensiteit en instelling van de zwartingskiezer R_s zou V_4 verlopen volgens de gestippelde rechte lijn b . Door de werking van de condensator C_k in fig. 18 is deze lijn evenwijdig aan de lijn a verschoven, zodat de afvaltijd van 3 ms van het relais wordt gecompenseerd. Het werkelijke verloop c ontstaat door het overgangsverschijnsel van het L - C -filter.

nominale waarde van de schakelspanning V_4 als functie van de tijd voor (de constante voorspanning is buiten beschouwing gelaten). Door de werking van de parallel met R_k geschakelde condensator C_k in de versterker is de rechte lijn zo ver naar boven verschoven dat dit neerkomt op een verschuiving naar links over een tijdsafstand $C_k R_k = 3$ ms (rechte lijn b). In werkelijkheid echter verloopt V_4 ten gevolge van het overgangsverschijnsel volgens de kromme c . Al naar gelang van de grootte van de uitschakelspanning in de figuur (strikt genomen ligt deze spanning vast en wordt de schaal van de grafiek in de ordinaatrichting overeenkomstig de stralingsintensiteit en de ingestelde R_s veranderd) heeft de afwijking van kromme c ten opzichte van b een meer of minder grote afwijking van de geschakelde dosis ten opzichte van de nominale waarde tot gevolg. De gunstigste dimensionering van de trillingskring is die waarbij de kromme c de rechte lijn b het vroegste snijdt zonder teveel door te schieten. Bij de Amplimat krijgen we kwantitatief het in fig. 21 voorgestelde verloop. De nominale waarde wordt reeds na 2 ms bereikt, terwijl het doorschieten slechts een maximaal dosisverschil van ongeveer 7% veroorzaakt.

Compensatie van spanningsinvloeden

Hierboven is uiteengezet (blz. 83) dat de spanningsafhankelijkheid van de ionisatiestroom aangepast is aan die van de filmzwarting bij een bepaalde combinatie van film en foelies. In de medische röntgenpraktijk zijn echter verschillende dergelijke combinaties in gebruik.

Met het oog op een zo breed mogelijke toepassing van de belichtingsautomaat is er voorzien in de mogelijkheid een correctie aan te brengen indien door het gebruik van foelies met afwijkende spanningsafhankelijkheid de zwarting nog blijkt te variëren met de anodespanning van de röntgenbuis. Hiertoe dienen de potentiometers R_9 en R_{10} (zie fig. 18), waarmee men de schakelspanning V_4 en dus de filmzwarting kan beïnvloeden. De potentiometer R_{10} is in de bedieningslessenaar gemonteerd, zodanig dat zijn contactarm bij het instellen van de opnamespanning wordt meebewogen. Aan de invloed die dit heeft op V_4 , kan men bij het afregelen van de gehele installatie bij benadering het voor de soort foelies vereiste verloop geven door instelling van R_9 .

De kortste schakeltijd in de praktijk

Volgens onderzoeken van Stieve^[10] is het voor de röntgenoloog van belang bij directe opnamen de belichtingstijd in sommige gevallen te kunnen vermindern tot 6 ms. Met een röntgengenerator van groot vermogen en bij een hoge buisspanning kan men bij dunne objecten inderdaad in zo korte tijden de juiste filmzwarting krijgen. Wil men bij zulke opnamen geen beperking ondervinden door de belichtingsautomaat, dan moet de kortste schakeltijd daarvan ook niet langer zijn. De eerste belichtingsautomaten, die een tiental jaren geleden werden ingevoerd, konden aan deze voorwaarde niet voldoen, daar hierbij voor het afschakelen van het net de normale schakelvoorzieningen van de röntgengeneratoren werden gebruikt. Eerst de invoering van een eigen schakelrelais, waarbij zoals boven beschreven de schakelvertraging sterk kon worden gereduceerd, heeft het succes van de belichtingsautomaat mogelijk gemaakt. Behalve dit relais is het enige element in de Amplimat dat nog een noemenswaardige vertraging kan veroorzaken het L - C -filter met zijn overgangsverschijnsel. De kortste schakeltijd is de som van de overgangstijd van het filter en de afvaltijd van het relais en bedraagt dus volgens fig. 21: $2 + 3 = 5$ ms.

Men kan zich nog afvragen, in hoeverre bij herhaald schakelen van een dergelijke korte opname gerekend kan worden op een *reproduceerbare* dosis. Afgezien van de spreiding in de afvaltijd van het schakelrelais, die enige tienden ms kan bedragen, moet rekening worden gehouden met twee spreidingsoorzaken:

- a) Het inschakelverschijnsel van de hoogspanningstransformator kan van keer tot keer verschillend verlopen. Na afloop van een opname blijft nl. in de ijzerkern van de hoogspanningstransformator een

[10] F. E. Stieve, The automatic exposure timer as a basis for automation in roentgen work, *Acta radiol.* 53, 459-480, 1960.

restmagnetisme achter, waarvan de grootte afhangt van het tijdstip van afschakelen. Het afschakelen kan, wanneer we ons tot één fase beperken, toevallig precies bij een nuldoorgang van de spanning gebeuren, maar ook op ieder willekeurig tijdstip in de positieve of negatieve periodehelft. Naar gelang van dit tijdstip krijgt men bij het weer inschakelen een verschillende grootte van de primaire stroom gedurende de eerste halve periode van het net, en hierdoor wordt op zijn beurt de grootte van de hoogspanning gedurende de eerste milliseconden beïnvloed. Het is duidelijk dat een dergelijke spreiding gedurende de eerste milliseconden bij korte belichtingstijden zich ook zal uiten als een spreiding van de dosis die met de belichtingsautomaat wordt verkregen, aangezien de (gemiddelde) intensiteit gedurende het meetproces en de intensiteit gedurende het afvallen van het relais niet gelijk zijn.

- b) De röntgenstraling bevat de door de gelijkrichter veroorzaakte rimpel (zie blz. 90). De dosis op de film wordt derhalve min of meer stootsgewijze opgebouwd, terwijl de signaalspanning dank zij de werking van het *L-C*-filter na afloop van het inschakelverschijnsel bij benadering *lineair* met de tijd groeit, net alsof de dosis werd geleverd door een gelijkpanning op de röntgenbuis. Naar gelang van het tijdstip waarop de signaalspanning de voor het afschakelen vereiste waarde bereikt, wijkt de werkelijk opgebouwde dosis meer of minder af van de lineaire stijging.

De spreiding van de dosis zal relatief groter zijn naarmate de rimpel van de buisspanning groter en de belichtingstijd korter wordt. Wil men de afwijking van de nominale waarde niet groter dan 20% laten worden (de hieraan beantwoordende afwijking in de gemiddelde zwarting van de film is in de praktijk als grenswaarde zonder meer aanvaardbaar), dan mag men bij de tweepulsröntgengenerator een schakeltijd van de belichtingsautomaat van 25 à 30 ms niet onderschrijden. Bij de zespulsgenerator wordt dank zij de kleinere rimpel de overeenkomstige grens pas bij ca. 5 ms bereikt. De ionisatiekamer moet in dat geval reeds binnen 2 ms na het begin van de belichting het afschakelcommando geven!

Voor het geval van de zespulsgenerator hebben we de resulterende spreiding experimenteel onderzocht. In fig. 22 is als functie van de belichtingstijd uitgezet de geschakelde dosis die bij een groot aantal opnamen werd verkregen. Deze dosis werd gemeten met een dosismeter waarvan de ionisatiekamer zich onmiddellijk achter de meetkamer van de Amplimat bevond, dus

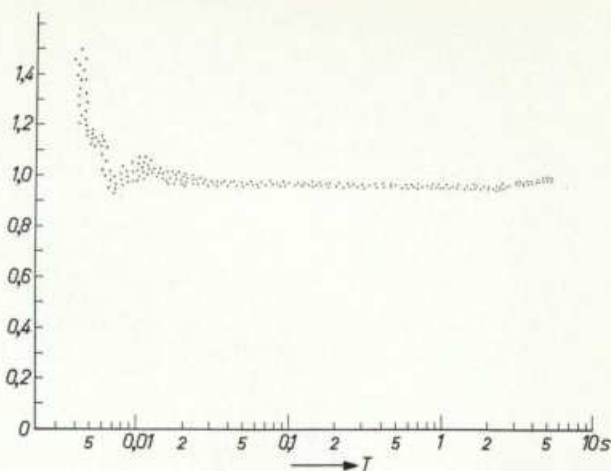


Fig. 22. Geschakelde dosis bij een groot aantal opnamen met verschillende belichtingstijd, gemaakt met een zespulsgenerator met behulp van de Amplimat. De werkelijk bereikte dosis werd hier gemeten met een dosismeter op de plaats waar zich anders de film bevindt. Pas bij schakeltijden korter dan 5 ms worden de afwijkingen van de nominale waarde (die gelijk aan 1 is gesteld) groter dan 20%.

op die plaats waar normaal de film staat. De spreiding blijkt bij lange belichtingstijden slechts enkele procent te bedragen, bij korte belichtingstijden wordt zij groter. Ook voor de geschakelde dosis vindt men steeds grotere waarden naarmate men dichterbij de tijdslimiet van 3 ms komt, die immers ook bij willekeurig grote intensiteit niet kan worden onderschreden. Bij de kortste belichtingstijd van 5 ms is de afwijking van de gewenste waarde echter in geen geval groter dan 20%.

Samenvatting. Bij de belichtingsautomaat „Amplimat” wordt een platte ionisatiekamer tussen de patiënt en de röntgenfilm geplaatst. De ionisatiekamer bevat drie meetvelden, die naar gelang van de anatomie van het af te beelden object kunnen worden ingeschakeld. De ionenstroom laadt een condensator en de toenemende spanning hierop levert een signaal, dat zodra een vooraf ingestelde waarde wordt bereikt, het uitschakelen van de röntgengenerator teweegbrengt. De fysische factoren die de constructie van de ionisatiekamer bepalen, worden in dit artikel enigszins uitvoerig besproken, in het bijzonder de wijze waarop men zorgt dat de gevoeligheid van de kamer op vrijwel dezelfde wijze van de röntgenbuis spanning afhangt als de filmzwarting, bij gebruik van een bepaalde versterkingsfoelie. Bij langdurige opnamen kunnen de ionenstromen heel klein zijn (b.v. 10^{-11} A bij een belichtingstijd van 5 s); om hiermee betrouwbaar te kunnen schakelen, is een in subminiatuurtechniek uitgevoerde voorversterker met een speciale elektrometerbuis rechtstreeks bij de ionisatiekamer ondergebracht. De afvaltijd van het schakelrelais stelt een onderste grens aan de bereikbare belichtingstijd; hij is door mechanische en elektrische maatregelen tot 3 ms gereduceerd. Door een kunstgreep in de schakeling van de versterker wordt de invloed van de afvaltijd op de geschakelde dosis gecompenseerd. Door verdere maatregelen wordt rekening gehouden met de rimpel die de röntgenstraling bij de gebruikelijke tweepuls- of zespulsgeneratoren vertoont alsmede met de spanningsinvloed bij gebruik van verschillende versterkingsfoelies. Experimenteel is gebleken dat bij tweepulsvoeding een kortste schakeltijd van 25 à 30 ms mogelijk is zonder dat de spreiding te groot wordt; bij zespulsvoeding kan men zelfs tot 5 ms gaan zonder dat de spreiding van de geschakelde dosis de toelaatbare waarde van 20% overschrijdt.